



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos**

**Simulación fluidodinámica del flujo partículas en un  
plasma durante una fulguración solar**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

**AUTOR**

Jenny Margot RAMOS LÁZARO

**ASESOR**

Mg. Beatriz Luisa SALVADOR GUTIÉRREZ

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Ramos, J. (2021). *Simulación fluidodinámica del flujo partículas en un plasma durante una fulguración solar*. [Tesis de de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jenny Margot Ramos Lázaro
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75816150
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-5300-5978">https://orcid.org/0000-0002-5300-5978</a>
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Beatriz Luisa Salvador Gutiérrez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10054063
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-6959-6103">https://orcid.org/0000-0001-6959-6103</a>
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Carlos Augusto Antonio Carbonel Huamán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08772534
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Juan José Guillermo Navarro
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10350242
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rolando Wilder Adriano Peña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41864353
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Beatriz Luisa Salvador Gutiérrez
Tipo de documento	DNI



Número de documento de identidad	10054063
<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	<p>Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos</p> <p>País: Perú</p> <p>Departamento: Lima</p> <p>Provincia: Lima</p> <p>Distrito: Cercado de lima</p> <p>Calle: Av. Universitaria con Av. Venezuela cuadra 34</p> <p>Latitud: -12.05608959</p> <p>Longitud: -77.0844981</p>
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Agosto 2019- noviembre 2021
URL de disciplinas OCDE	<p>Ingeniería mecánica</p> <p><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01</a></p>



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE  
FLUIDOS**

*Siendo las 17:45 horas del martes 30 de noviembre de 2021, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Dr. Ing. CARLOS AUGUSTO ANTONIO CARBONEL HUAMAN (Presidente), Mg. Ing. JUAN JOSÉ GUILLERMO NAVARRO (Miembro), Mg. ROLANDO WILDER ADRIANO PEÑA (Miembro) y la Mg. Ing. BEATRIZ LUISA SALVADOR GURIÉRREZ (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Sustentación y aprobación de Tesis, de la Bachiller:*

**JENNY MARGOT RAMOS LÁZARO**

*El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como del Resumen del Expediente e invitó a la citada Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis titulada: “SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA DEL FLUJO PARTÍCULAS EN UN PLASMA DURANTE UNA FULGURACIÓN SOLAR”.*

*Concluida la exposición de la candidata y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó a la Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.*

*Al término de la deliberación el Presidente de Jurado invitó a la candidata y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por la bachiller, la misma que ha sido de:*

**18**

.....  
(NÚMERO)

**Dieciocho**

.....  
(LETRAS)

*Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.*

*El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional y su elevación al Consejo Universitario para*



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

*conferir el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos a la Bachiller JENNY MARGOT RAMOS LÁZARO.*

*Siendo las 18:55 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.*

*Ciudad Universitaria, 30 de noviembre de 2021*

DR. ING. CARLOS A. A. CARBONEL HUAMÁN  
PRESIDENTE DEL JURADO

MG. ING. JUAN JOSÉ GUILLERMO NAVARRO  
MIEMBRO DEL JURADO

Mg. ROLANDO WILDER ADRIANO PEÑA  
MIEMBRO DEL JURADO



Firmado digitalmente por SALVADOR  
GUTIÉRREZ Beatriz Luisa FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 03.12.2021 17:37:36 -05:00

MG. Ing. BEATRIZ LUISA SALVADOR GUTIÉRREZ  
ASESOR DEL JURADO



Firmado digitalmente por ROJAS  
ACUÑA Joel FAU 20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 09.12.2021 12:57:49 -05:00

DR. JOEL ROJAS ACUÑA  
VICEDECANO ACADÉMICO ( e ) FCF

*Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:*

<https://us06web.zoom.us/j/84812657012?pwd=K3dITXI3Tmg5SUxtWS9SK1lxT2Ztdz09>

ID de reunión: 848 1265 7012

Código de acceso: 363019

*Grabación archivada en el siguiente enlace:*

## **Dedicatoria y Agradecimiento**

Agradezco infinitamente a mis padres Jesús y Nimia, ellos son los pilares de mi existencia y la luz que ilumina mi camino. Su fuerza y consejos me guían, me motivan a continuar, los amo con todo mi corazón y mi alma. Quiero agradecerlos todo el esfuerzo y dedicación que dieron por sus hijas, las palabras son cortas para expresarle mi amor, solo me queda decirles que nacieron para ser padres. Les agradezco por creer en esta soñadora que vive pensando en el universo.

Te dedico ese trabajo Madre, una mujer fuerte, inteligente, perseverante y valiente, tu sembraste en mi alma la semilla del conocimiento el anhelo por conocer y descubrir, el amor a la ciencia, matemáticas, literatura y el arte. Siempre confiaste en mí y en mis sueños. Me enseñaste que la fuerza y la valentía, puede estar acompañada de dulzura y empatía. Tú y mi Padre siempre serán los mejores maestros y mejores amigos que he tenido.

Te dedico este trabajo Padre, un hombre inteligente, fuerte, perseverante y valiente, porque siempre confiaste en mí y me enseñaste a nunca limitar mis metas y anhelos, me inculcaste el amor a la ciencia y las matemáticas, tú me enseñaste el verdadero sentido de la valentía y la fuerza de alma, tus palabras siempre me guiaran, hacia donde me dirija y tu ejemplo iluminara mi camino. Siempre estarás en mi corazón.

Agradezco de mis hermanas, Antuane y Nidia Alexandra, las amo mucho, su apoyo moral y cariño me ayudan a seguir adelante.

Agradezco, a mi Asesora de Tesis Beatriz Salvador Gutiérrez, por el apoyo académico y moral, fue Usted una gran guía durante todo el proceso de realización de la tesis.



*“Fue el tiempo que pasaste con tu rosa la que la hizo tan importante”, pintado por Seterny*

## Resumen

Las fulguraciones solares (FS) son grandes liberaciones de energía producto de la reconexión magnética de estructuras magnéticas en el sol (prominencias), estos eventos son altamente peligrosos para la humanidad y no todos han sido estudiados, es decir no se conoce el origen o causa de cada evento. Como ocurre en nuestra investigación, donde el problema de estudio fue encontrar: **que estructura magnética y condiciones iniciales del plasma**, generan el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar (reconexión magnética) M4.4 del 8 de marzo del 2011, usando un enfoque MHD. Ante lo expuesto, se plantea como hipótesis que la reconexión magnética en los campos magnéticos de la prominencia (cuerda de flujo) de la fulguración solar de estudio (seleccionada de NOAA 2010-2019), **se produce** debido a la presencia de un flujo emergente y las diversas condiciones iniciales de presión y resistividad elegidas. Para validar la hipótesis se diseñó un modelo numérico 2D, En PLUTO considerando el flujo emergente y las condiciones iniciales de plasma y campo magnético (extraídos de AIA/SDO), en tres escenarios de simulación con presión inicial (0.5 Pa, 1.5 Pa y 2.0 Pa) y resistividad (0.02  $\Omega \cdot m$ , 0.04  $\Omega \cdot m$  y 0.05  $\Omega \cdot m$ ). Logrando replicar la evolución cinemática de la cuerda de flujo y la reconexión magnética observada (AIA/SDO) en los tres escenarios, calculando un error en los tiempos de reconexión de 0, 3.3 % y 7.7 %, identificando tres marcadas etapas: cuasi estática, reconexión magnética y post- reconexión magnética. Además, se obtuvieron los perfiles de presión, densidad, temperatura y velocidad del plasma, obteniendo un error alto de la velocidad real y observacional, por lo que se concluye que la hipótesis planteada logra explicar el origen de reconexión magnética en la cuerda de flujo, pero no por completo la evolución cinemática debido a ciertas limitaciones (capítulo 6, ítem 6.11). La metodología, estuvo compuesta por los siguientes pasos: recolección de datos, selección y descripción de evento, selección de software, modelo numérico y análisis de resultados. En forma particular la presente Tesis propone un enfoque MHD en la fulguración solar de estudio, además la investigación se sumará a otras de la misma línea, para construir un modelo de pronóstico que menguará los efectos de FS en el sector energía, comunicaciones, salud, etc.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Capítulo I: Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1	Planteamiento del problema .....	2
1.1.1	Formulación del problema.....	4
1.1.1.1	Problemas específicos .....	4
1.2	Objetivos .....	5
1.2.1	Objetivo general .....	5
1.2.2	Objetivos específicos.....	5
1.3	Hipótesis.....	5
1.4	Justificación e importancia.....	6
1.5	Metodología.....	7
<b>2</b>	<b>Capítulo II: Marco Teórico .....</b>	<b>10</b>
2.1	Antecedentes .....	10
2.2	El sol y su estructura .....	11
2.2.1	La superficie solar: Fotosfera .....	12
2.2.2	La atmosfera solar: la cromosfera y Corona.....	12
2.3	Fulguraciones solares .....	13
2.4	Clasificación de Fulguraciones Solares.....	14
2.5	ETAPAS DE FULGURACIONES SOLARES.....	15
2.5.1	Etapas de Acumulación de Energía .....	16
2.5.1.1	Prominencia.....	17
2.5.1.2	Cuerda de Flujo .....	18
2.5.1.3	Origen de los componentes del campo total( Cuerda de flujo y flujo emergente) ....	19
2.5.1.3.1	Nacimiento de una cuerda de flujo en una prominencia .....	20
2.5.1.3.2	Flujo emergente secundario.....	21
2.5.2	Etapas de Liberación de Energía.....	21
2.5.2.1	Reconexión magnética.....	22
2.5.3	Etapas de Transporte de Energía.....	25
2.5.3.1	Expulsión Masiva.....	25
2.6	El efecto de las Fulguraciones solares sobre el clima espacial y la humanidad .....	26
2.6.1	Algunos eventos históricos de Fulguraciones solares .....	26
2.6.2	Efectos en el sector energía .....	28
2.6.3	Efectos en las telecomunicaciones .....	28
2.7	Ecuaciones básicas de Mecánica de Fluidos .....	29
2.7.1	Conservación de la masa .....	29
2.7.2	Ley de conservación de cantidad de Movimiento .....	30
2.7.3	Ecuación de Navier-Stokes.....	30

2.8	Ecuaciones básicas del Electromagnetismo .....	30
2.8.1	Ecuaciones de Maxwell en Forma diferencial.....	30
2.8.2	Ley De Gauss .....	31
2.8.3	Ley de Gauss para campo Magnético.....	32
2.8.4	Ley de Inducción electromagnética de Faraday .....	32
2.8.5	Ley de Ampere -Maxwell.....	32
2.9	El plasma .....	33
2.10	Magnetohidrodinámica.....	33
2.10.1	Línea de Campo Magnético.....	35
2.10.2	Suposiciones de la Magnetohidrodinámica .....	35
2.10.3	Enfoques de Magnetohidrodinámicas .....	36
2.10.3.1	Magnetohidrodinámica Ideal.....	36
2.10.3.2	Magnetohidrodinámica Resistiva .....	36
2.11	Ecuaciones de Magnetohidrodinámica.....	37
2.11.1	Ecuación de continuidad.....	37
2.11.2	Ecuación de Movimiento.....	38
2.11.2.1	Fuerza de Lorentz .....	39
2.11.3	Ecuación de Energía.....	41
2.11.4	Ecuación de Inducción .....	42
2.11.4.1	Numero de Reynolds .....	44
2.11.5	Representacion del campo Magnetico.....	45
2.11.6	Beta del plasma .....	46
2.11.7	Resistividad del Plasma.....	47
2.12	Enfoques de estudio del inicio de la etapa de liberación de energía .....	47
2.13	Método de volúmenes Finitos .....	48
2.13.1	Formulación de volúmenes finitos (Mignone,2021) .....	49
2.13.1.1	Cálculo del Flujo .....	50
2.13.1.2	Cálculo de flujo hiperbólico .....	51
2.13.1.3	Cálculo del Flujo Parabólico (difusivo).....	51
2.14	Software PLUTO.....	53
2.14.1	Esquema de trabajo en pluto.....	53
2.14.1.1	El algoritmo reconstruir-resolver-actualizar.....	54
<b>3</b>	<b>Capítulo III: Selección y descripción del objetivo de estudio.....</b>	<b>56</b>
3.1	Instrumentos Utilizados.....	57
3.1.1	Telescopios espaciales de rayos-X: GOES.....	57
3.1.2	AIA (The Atmospheric Imaging Assembly) en Solar Dynamics Observatory (SDO). 57	
3.2	Base de Datos .....	58

3.3	Selección de la Fulguración Solar a estudiar .....	59
	Paso 1: Selección de Región solar de estudio .....	59
	Criterio 1: Por Intensidad de evento en las regiones solares .....	59
	Criterio 2: Tiempo de ocurrencia entre eventos registrados.....	60
	Criterio 3: Intervalo de tiempo del evento.....	61
	Criterio 4: Posición en el sol de la región activa .....	61
	Selección final de la región de estudio .....	63
	Región solar Seleccionada.....	64
	Paso 2: Selección de la fulguración solar en la Región NOAA 11165 .....	65
	I) Descripción de las fulguraciones (M4.4 y M1.4) de la región activa NOAA 11165 con GOES-15 .....	65
	III) Resumen de la región activa NOAA 11165 de la fulguración solar M4.4.....	67
	III)Resumen de la región activa NOAA 11165 de la fulguración solar m1.4 .....	68
3.4	Selección Final de la fulguración solar de estudio .....	69
3.5	Descripción de la fulguración solar seleccionada.....	70
3.5.1	Prominencia.....	71
3.5.2	Configuración magnética: Cuerdas de Flujo .....	72
3.5.3	Reconexión Magnética .....	75
3.5.4	Liberación de energía: reconexión magnética en la cuerda de flujo 1 .....	76
3.5.5	Evolución cinemática de la Cuerda de Flujo (18:10 UT-18:33 UT) .....	78
3.5.6	Cálculo de Velocidades en la cuerda de flujo 1.....	79
3.6	Resumen de las Etapas de la fulguración M4.4 del 8 de marzo del 2011 .....	80
<b>4</b>	<b>. Capítulo IV: Modelo de Simulación Numérica.....</b>	<b>81</b>
4.1	Caso de estudio y Objetivo de simulación .....	81
4.1.1	Cuerda de Flujo Magnética de la región NOAA 11165 .....	82
4.2	Causa de la reconexión magnética en la cuerda de flujo: la emergencia de flujo junto con las condiciones de presión y resistividad inicial .....	83
4.2.1	Emergencia de flujo.....	83
4.2.2	Ecuaciones Gobernantes.....	86
4.2.3	Condiciones Iniciales .....	86
4.2.3.1	Configuración Magnética Inicial (Chen y Shibata,2000) .....	87
a)	Campo magnético de fondo.....	87
b)	Campo magnético de Imagen de corriente .....	88
c)	Campo magnético de la línea de Corriente magnética .....	88
d)	Campo magnético del flujo emergente.....	89
e)	Campo Magnético Total.....	89
4.2.3.2	Condición inicial de temperatura, densidad y Presión (Chen y Shibata,2000) .....	90
4.2.3.3	Función de Resistividad (Chen y Shibata,2000) .....	90



4.2.4	Malla Computacional .....	90
4.2.5	Condiciones de Borde .....	92
4.2.6	Tabla de unidades de los parámetros estudiados del modelo. ....	92
4.2.7	Tiempo.....	92
4.2.8	Escenarios de simulación: Condiciones iniciales de presión y resistividad .....	93
4.3	Software PLUTO.....	94
4.3.1	Esquema de Trabajo de PLUTO(Mignone, 2007).....	94
	PASO 1: Conversión de Variables.....	94
	PASO 2: Selección del Método de Reconstrucción .....	95
	PASO 3: Solucionador del problema de Riemann .....	95
	PASO 4: Selección de Método de evolución Temporal .....	95
<b>5</b>	<b>Capítulo V: Resultados .....</b>	<b>96</b>
5.1	Finalidad de la Simulación Numérica .....	98
5.2	Primer Escenario de Simulación .....	99
5.2.1	Resultados de la evolución global de la cuerda de flujo simulada .....	102
5.2.2	Evolución de hoja de Corriente .....	107
5.2.3	Evolución de Velocidad de la Cuerda de Flujo .....	110
5.2.4	Evolución de Temperatura Global.....	111
5.2.5	Evolución de densidad.....	112
5.2.6	Evolución de Presión de gas.....	114
5.2.7	Evolución de Presión Magnética .....	115
5.3	Segundo escenario de Simulación .....	116
5.3.1	Resultados de la evolución Global de la cuerda de flujo (segundo escenario).....	118
5.3.2	Evolución de hoja de Corriente .....	121
5.3.3	Evolución de Velocidad de la Cuerda de Flujo .....	124
5.3.4	Evolución de Temperatura .....	125
5.3.5	Evolución de Presión de gas.....	127
5.3.6	Evolución de Densidad.....	128
5.3.7	Evolución de Presión Magnética .....	129
5.4	Tercer Escenarios de Simulación .....	130
5.4.1	Evolución Global.....	132
5.4.2	Evolución de hoja de Corriente .....	137
5.4.3	Evolución de Velocidad de la Cuerda de Flujo .....	140
5.4.4	Evolución de Temperatura .....	142
5.4.5	Evolución de Presión de gas.....	143
5.4.6	Evolución de Densidad.....	144
5.4.7	Evolución de Presión Magnética .....	146

<b>6</b>	<b>. Capítulo VI: Análisis de Resultados .....</b>	<b>147</b>
6.1	Análisis de la Descripción de Evento.....	147
6.2	Escenarios de simulación. ....	148
6.3	Análisis de la evolución de la cuerda de Flujo simulada en los tres escenarios de simulación. 149	
6.3.1	Etapa Cuasi Estática .....	149
6.3.2	Etapa de reconexión magnética .....	151
6.3.3	Etapa de Post-Reconexión magnética .....	156
6.4	Análisis de la velocidad en la cuerda de Flujo simulada.....	157
6.5	Velocidad en el punto X.....	159
6.6	Densidad.....	161
6.7	Presión de gas.....	162
6.8	Temperatura.....	164
6.9	Presión Magnética .....	165
6.10	Cálculo de Error entre Datos simulados y observados .....	167
6.10.1	Error para velocidad de la cuerda de flujo.....	167
6.10.2	Error en tiempos de reconexión.....	170
6.11	Validación de la hipótesis.....	172
<b>7</b>	<b>. Capítulo VII: Conclusiones .....</b>	<b>175</b>
<b>8</b>	<b>. Anexos .....</b>	<b>180</b>
	Anexo A: Tablas de regiones solares y eventos por año .....	181
	Anexo B: Espectro electromagnético .....	185
	Anexo C: Datos AIA/SDO de M4.4 / M1.4 y eyecciones de masa coronal.....	186
	I) Características del campo magnético y el plasma de la región activa durante la fulguración M4.4(18:10UT -18:40 UT).....	186
	a) Observaciones con Goes-15 .....	186
	b) Observaciones con AIA 131 <b>A</b> .....	186
	c) Observaciones con AIA 94 <b>A</b> .....	187
	c) Observaciones con AIA 193 <b>A</b> .....	187
	d)Observaciones con AIA 304 <b>A</b> .....	188
	e) Observaciones con AIA 171 <b>A</b> .....	188
	II) Características del campo magnético y la plasma de la región activa durante la fulguración M1.4(19:46 UT -21:19 UT).....	189
	a) Observaciones con AIA 94 <b>A</b> .....	189
	b) Observaciones con AIA 304 <b>A</b> .....	190
	c)Observaciones con AIA 171 <b>A</b> .....	190
	d)Observaciones con AIA 193 <b>A</b> .....	190
	III)Descripción de las eyecciones de Masa Coronal asociadas a la región NOAA 11165 (18:00 UT – 22:00 UT).....	191

Anexo D: Softwares de Código libre en Magnetohidrodinámica.....	192
Criterios de selección de Software .....	193
<b>Bibliografía .....</b>	<b>195</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Fulguraciones solares.....	2
Figura 1.2. Estructura magnética que almacena energía. ....	4
Figura 2.1. Estructura solar. ....	11
Figura 2.2. Vistas complementarias de la corona solar. ....	12
Figura 2.3. Fulguración solar. ....	13
Figura 2.4. Fulguración solar emitida en diferentes bandas del espectro electromagnético. ....	13
Figura 2.5. Clasificación de las fulguraciones solares. ....	14
Figura 2.6. Prominencias.....	15
Figura 2.7. Sigmoide y Prominencia .....	15
Figura 2.8. Explosión de prominencias. ....	15
Figura 2.9. Etapa de transporte de energía. ....	15
Figura 2.10. Filamento o Prominencia. ....	17
Figura 2.11. Morfología de una prominencia. ....	18
Figura 2.12. Cuerda de flujo.....	18
Figura 2.13. Cuerda de Flujo magnética en diferentes perspectivas. ....	19
Figura 2.14. Nacimiento de la cuerda de flujo. ....	20
Figura 2.15. Líneas de campo magnético dirigiéndose al punto nulo. ....	22
Figura 2.16. Hoja de corriente. Fuente: (Priest &Forbes,2000) .....	23
Figura 2.17. Hoja de corriente evolucionando. Fuente: (Priest &Forbes,2000).....	23
Figura 2.18. Líneas de campo magnético en la reconexión magnética. ....	23
Figura 2.19. Secuencia de reconexión en la atmosfera solar.....	24
Figura 2.20. Ubicación del punto X. ....	25
Figura 2.21. Hoja de Corriente. ....	25
Figura 2.22. Imagen de Eyecciones de Masa Coronal. ....	26
Figura 2.23. Relación-Tierra sol.....	26
Figura 2.24. Tormenta Carrington.....	27
Figura 2.25. efectos de las fulguraciones solares sobre tierra. ....	28
Figura 2.26. Representación de un elemento fluido. Fuente: (Schnac,2009). ....	34
Figura 2.27. Movimiento de flujo. ....	37
Figura 2.28. Movimiento de flujo. ....	39
Figura 2.29.Comportamiento de los campos magnéticos en el plasma.....	40
Figura 2.30. Tiempo y espacio en la malla.....	49
Figura 2.31. Intervalos de tiempo y espacio.....	50
Figura 2.32. Vector de cantidades conservados y celdas.....	51
Figura 2.33. Volúmenes promedio. ....	54
Figura 2.34. Reconstrucción.....	55
Figura 2.35. Resolviendo el problema de Riemann.....	55
Figura 3.1.Selección y descripción de la fulguración solar seleccionada. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Figura 3.2. Representación del GOES-R. (Jenner,2017).....	57
Figura 3.3.) Nave espacial del SDO (NASA,2015). b) Instrumento The Atmospheric Imaging Assembly (Addinson y Pesnell,2015) .....	58
Figura 3.4.Ejemplo de estructura de datos del año 2010. Fuente: GOES-data web.....	58
Figura 3.5.Distribución total del número de eventos en las regiones activas por año.....	60
Figura 3.6.Distribución total del número de fulguraciones solares en las regiones activas por año. ....	61
Figura 3.7. Area de selección azul dentro de la Fotosfera Solar .....	61
Figura 3.8.Sol.....	62
Figura 3.9. El sol 8 de marzo del 2011.....	64
Figura 3.10. Fulguración de estudio M4.4 ocho de marzo del 2011 .....	66
Figura 3.11. Evolución del evento de la región activa AIA 304 A , 171 A , 131,94 A y 193 A .....	67

Figura 3.12. Evolución del evento de la región activa AIA 94 A ,131 A ,171 A ,193 A y 304 A ....	68
Figura 3.13. Cuerda de Flujo, reconexión magnética. Fuente: AIA/SDO.....	69
Figura 3.14. Descripción de la fulguración solar de estudio .....	70
Figura 3.15.Evolución de prominencia. ....	71
Figura 3.16. Vista lateral de la prominencia desde las 18:08 UT hasta las 18:27 UT.....	72
Figura 3.17.Cuerda de Flujo.....	73
Figura 3.18.Cuerdas de Flujo con AIA 94 A`.....	74
Figura 3.19. Cuerda de flujo.....	74
Figura 3.20. Evolución de la cuerda de flujo.....	75
Figura 3.21. Liberación de energía.....	77
Figura 3.22. Evolución de la cuerda de flujo magnético en AIA 94 A` Fuente: AIA/SDO. ....	78
Figura 3.23. Gráfico Altura-tiempo cuerda de flujo 1.....	79
Figura 3.24. Velocidad de la cuerda de flujo.....	79
Figura 3.25. Esquema de etapas de fulguración solar .....	80
Figura 4.1. a) Cuerda de flujo. Fuente: (NASA2005). b) observaciones de cuerda de flujo asociada a la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 en AIA 193 A, 94 A y 131 A. Fuente: AIA/SDO. ....	81
Figura 4.2. Fulguración solar en GOES.Fulguración solar (18:10 UT-18:48 UT). Desde las 18:14 hasta las 18:30 se registra los valores máximos. Fuente: GOES .....	81
Figura 4.3. Prominencia en diferentes perspectivas. ....	82
Figura 4.4. Cuerda de flujo.....	82
Figura 4.5. Cuerda de flujo.....	83
Figura 4.6. Cuerda de flujo en diferentes perspectivas .....	84
Figura 4.7. Cuerda de flujo interactúa con un flujo emergente. Fuente: Elaboración de propia. ....	84
Figura 4.8. Creación de la hoja de corriente eléctrica. Fuente: Elaboración propia. ....	85
Figura 4.9.Reconexión magnética en el punto X. Fuente: Elaboración propia. ....	85
Figura 4.10. Cuerda de flujo elevándose. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 4.11. Cuerda de flujo.....	86
Figura 4.12. Posiciones de los cuatros corrientes en el eje X y Y. Fuente: Elaboración propia. ....	87
Figura 4.13. Campo de imagen de corriente. Fuente: Elaboración propia. ....	88
Figura 4.14. La circunferencia ubicada en el punto (0,2) y de radio $r_0=0.5$ . ....	89
Figura 4.15. Configuración magnética inicial. Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 4.16. Cuerda de flujo.....	91
Figura 4.17. Malla Computacional.....	91
Figura 4.18. Flujo de trabajo en PLUTO. Fuente: Adaptado de (Mignone,2007). ....	94
Figura 5.1. Esquema de trabajo en PLUTO. Fuente: Elaboración propia. ....	96
Figura 5.2.Esquema de Evolución de la cuerda de flujo. ....	97
Figura 5.3. Cuerdas de flujo. ....	98
Figura 5.4. Cuerda de flujo 3D.....	98
Figura 5.5. Cuerdas de flujo simulada y observadas.....	100
Figura 5.6. Cuerda de flujo 3D.....	100
Figura 5.7. Evolución de Densidad en el tiempo. Fuente: Elaboración propia. ....	102
Figura 5.8. Evolución de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 5.9. Cuerda de flujo en $t=1$ .Fuente: Elaboración propia. ....	104
Figura 5.10. Cuerda de flujo en estado estable. Fuente: Elaboración propia. ....	105
Figura 5.11.Hoja de corriente en la cuerda de flujo en $t=214$ s. Fuente: Elaboración propia. ....	105
Figura 5.12.Evolución de la cuerda de flujo desde $t=230$ s hasta $t=960$ s.....	106
Figura 5.13.Secuencia de Formación de hoja de Corriente. Fuente: Elaboración propia. ....	108
Figura 5.14.Evolución de cuerda de Flujo desde $t=230$ s hasta $t=960$ s. Fuente: Elaboración propia. ....	109
Figura 5.15.Velocidades en el punto X (0,1.7). Fuente: Elaboración propia. ....	110
Figura 5.16.Gráfico de distribuciones de Velocidades en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.....	110
Figura 5.17. Evolución temporal de temperatura. Fuente: Elaboración propia.....	111
Figura 5.18.Evolución de densidad. Fuente: Elaboración propia.....	112
Figura 5.19. Evolución de presión. Fuente: Elaboración propia. ....	114
Figura 5.20.Presión Magnética. Fuente: Elaboración propia. ....	115
Figura 5.21.a) Cuerda de flujo simulada escenario 2. Fuente: Elaboración propia.....	117

Figura 5.22. Evolución de la Densidad. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 5.23. Evolución de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.	119
Figura 5.24. Evolución de cuerda de Flujo. Fuente: Elaboración propia.	120
Figura 5.25. Evolución de la hoja de corriente alrededor del punto x donde ocurre la reconexión magnética. Fuente: Elaboración propia.	122
Figura 5.26. a) Reconexión magnética b) Evolución de la velocidad en hoja de Corriente.	124
Figura 5.27. Gráfico de evolución de velocidad en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 5.28. Evolución temporal de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 5.29. Evolución de Presión. Fuente: Elaboración propia.	127
Figura 5.30. Evolución de densidad. Fuente: Elaboración propia.	128
Figura 5.31. Presión magnética. Fuente: Elaboración propia.	129
Figura 5.32. Cuerda de flujo simulada escenario 3. Fuente: elaboración propia.	131
Figura 5.33. Evolución de Densidad. Fuente: Elaboración propia.	132
Figura 5.34. Secuencia de imágenes de cuerda de flujo y su temperatura.	133
Figura 5.35. Comportamientos de la cuerda de flujo.	134
Figura 5.36. Evolución de la cuerda de flujo de $t=0$ s hasta $t=160$ s. Fuente: Elaboración propia.	134
Figura 5.37. a) Evolución de la cuerda de flujo de $t=200$ s hasta $t=323$ s b) hoja de corriente.	136
Figura 5.38. Evolución de la Cuerda de Flujo. Fuente: Elaboración propia.	137
Figura 5.39. a) Cuerda de flujo b) Dirección de flujos de reconexión. Fuente: Elaboración propia.	138
Figura 5.40. Evolución de velocidades. Fuente: Elaboración propia.	139
Figura 5.41. Gráfico de distribuciones de velocidades en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.	140
Figura 5.42. Evolución temporal de temperatura. Fuente: Elaboración propia.	142
Figura 5.43. Evolución de Presión. Fuente: Elaboración propia.	143
Figura 5.44. Evolución de densidad. Fuente: Elaboración propia.	144
Figura 5.45. Presión magnética. Fuente: Elaboración propia.	146
Figura 6.1. Cuerdas de flujo	147
Figura 6.2. Cuerda de flujo y reconexión magnética.	148
Figura 6.3. Cuerda de flujo simulada.	150
Figura 6.4. Etapa cuasi estática en los diferentes escenarios.	151
Figura 6.5. Reconexión magnética.	153
Figura 6.6. Escenarios 1,2 y 3, Formación de hoja de corriente eléctrica.	154
Figura 6.7. Etapa post reconexión en los tres escenarios de simulación 1,2 y 3.	155
Figura 6.8. Evolución de la cuerda de flujo en los 3 escenarios de simulación durante sus 3 etapas.	156
Figura 6.9. Comparación de Velocidades en los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia.	157
Figura 6.10. Velocidad dentro de la hoja de corriente punto X(0,1.7). Fuente: Elaboración propia.	159
Figura 6.11. Densidad. Fuente: Elaboración propia.	161
Figura 6.12. Presión. Fuente: Elaboración propia.	162
Figura 6.13. Evolución de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.	164
Figura 6.14. Presión Magnética. Fuente: Elaboración propia.	165
Figura 6.15. Comparación de velocidades. Fuente: Elaboración propia.	168
Figura 6.16. Reconexión magnética.	170
Figura 6.17. Comparación de cuerda de flujo observada y simulada.	171
Figura 8.1. Espectro electromagnético.	185
Figura 8.2. Evolución de fulguración.	186
Figura 8.3. Evolución temporal de la cuerda de flujo desde las 18:24 UT hasta las 18:40 UT.	186
Figura 8.4. Cuerdas de flujo.	187
Figura 8.5. Evolución temporal con AIA 194 Å. Fuente: AIA/SDO.	187
Figura 8.6. Evolución de la prominencia desde las 18:08 UT hasta 18:28 UT.	188
Figura 8.7. Evolución del filamento/prominencia.	188
Figura 8.8. a) Evolución del evento con GOES-15 b) Evolución de la región activa asociada a la fulguración M1.4. Fuente: AIA/SDO.	189
Figura 8.9. Evolución de la Región Activa NOAA 11165. Fuente: AIA/SDO.	189
Figura 8.10. Evolución de la región activa NOAA 11165. Fuente: AIA/SDO.	190
Figura 8.11. Evolución de la cuerda de flujo AIA 171 Å. Fuente: AIA/SDO.	190
Figura 8.12. Evolución de la cuerda de flujo AIA 171 Å. Fuente: AIA/SDO.	191

Figura 8.13.Evolución de la cuerda de flujo AIA 171 A. Fuente: SOHO/LASCO.....	191
Figura 8.14.Evolución de la eyección de Masa Coronal en AIA 193. Fuente: SOHO/LASCO. ....	192

## Índice de Tablas

Tabla 2.1.Clases de fulguraciones .....	14
Tabla 3.1.Numero de eventos por año.....	59
Tabla 3.2. Numero de regiones activas y características de la misma.....	62
Tabla 3.3.Fulguraciones registradas en la región NOAA 11165.....	64
Tabla 3.4.Tiempo y altura. ....	79
Tabla 3.5. Tiempo vs velocidad. ....	79
Tabla 4.1.Unidades de parámetros en el modelo.....	92
Tabla 4.2.Condiciones iniciales de presión en cada escenario de simulación.....	93
Tabla 5.1.valores de parámetros iniciales.....	101
Tabla 5.2. Etapas .....	107
Tabla 5.3.Evolución de Temperatura. ....	112
Tabla 5.4.Evolución de densidad. ....	113
Tabla 5.5.Evolución de Presión de gas.....	115
Tabla 5.6.valores de parámetros iniciales.....	117
Tabla 5.7. Etapas. ....	121
Tabla 5.8.Velocidad .....	123
Tabla 5.9.Evolución de Temperatura. ....	126
Tabla 5.10.Evolución de Presión.....	127
Tabla 5.11. Evolución de densidad .....	129
Tabla 5.12. Valores de parámetros iniciales.....	131
Tabla 5.13.Etapas .....	137
Tabla 5.14.Evolución de la velocidad en hoja de Corriente.....	140
Tabla 5.15.Velocidad de la cuerda de flujo.....	141
Tabla 5.16. Evolución de temperatura.....	143
Tabla 5.17. Evolución de Presión.....	144
Tabla 5.18.Evolucion de densidad. ....	145
Tabla 6.1.Diferentes valores de presión inicial y resistividad para cada escenario de simulación. ....	149
Tabla 6.2.Tabla. Etapas de la cuerda de Flujo.....	149
Tabla 6.3.Temperatura. ....	164
Tabla 6.4. Presión magnética intervalos en los tres escenarios .....	165
Tabla 6.5.Escenarios de simulación .....	165
Tabla 6.6. Velocidad observacional y Velocidad simulada.....	167
Tabla 6.7. Velocidad observacional y Velocidad simulada.....	167
Tabla 6.8. Velocidad observacional y Velocidad simulada.....	168
Tabla 6.9.Tiempos de reconexión magnética. ....	170
Tabla 7.1. Valores de presión y resistividad inicial en los tres escenarios de simulación.....	175
Tabla 7.2. Errores en los escenarios. ....	178
Tabla 8.1.Años 2010,2011 y 2012. ....	181
Tabla 8.2. Año 2013,Tabla 8.3.Año 2014 y Tabla 8.4.Año 2015.....	182
Tabla 8.5.Año 2016 .....	182
Tabla 8.6.Año 2017.....	182
Tabla 8.7,Año 2010,Tabla 8.8.Año 2011 y Tabla 8.9.Año 2012. ....	183
Tabla 8.10.Año 2013.....	183
Tabla 8.11.Año 2014 y Tabla 8.12.Año 2015 .....	184
Tabla 8.13.Año 2016.....	184
Tabla 8.14.Año 2017 .....	184
Tabla 8.15.Rango de frecuencias. ....	185
Tabla 8.16. Rango de espectros.....	185
Tabla 8.17. Selección de software.....	194

# 1 Capítulo I: Introducción

La Mecánica de Fluidos está sostenida sobre bases sólidas de una “Ciencia evolucionada”, que crece conforme avanza el tiempo. Sir Isaac Newton (1642-1727), sentó las bases del conocimiento acerca de las fuerzas que domina a los fluidos y sus características. Tiempo después muchos científicos se sumaron en esta travesía cuyo legado fue una “Ingeniería Mecánica de fluidos” más minuciosa. Sin embargo, el papel protagonista se lo lleva las famosas ecuaciones de Navier-Stokes las cuales tiene una aplicabilidad infinitamente explorable, hasta la actualidad. Por otro lado, una de las áreas de la ciencia también estudiada paralelamente a la mecánica de fluidos fue la del “Electromagnetismo”, expresada a través de las leyes de Maxwell, que explican el comportamiento de los campos magnéticos y eléctricos, ecuaciones ampliamente usadas en el la ingeniería.

Las áreas anteriormente mencionadas se unen en la magnetohidrodinámica, el cual es un enfoque de estudio de la dinámica del fluido plasma, que usa como base teórica a las ecuaciones de Navier Stokes de la mecánica de fluidos y las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo. La magnetohidrodinámica, se aplica en la generación de energía, motores y estudios de fenómenos en donde el fluido está sometido a altas energías como ocurre en el Sol, un gran laboratorio de plasma cuyo comportamiento y fenómenos todavía sigue siendo motivo de investigaciones constantes. Uno de los eventos más sorprendentes que ocurren en nuestra estrella y que involucran procesos de mecánica de fluidos y electromagnetismo son las “Fulguraciones Solares” (FS), que son grandes liberaciones de energía asociada a explosiones de estructuras magnéticas solares compuestas del plasma. Estas pueden generar las peligrosas tormentas geomagnéticas que amenazan el desarrollo, social, económico, tecnológico y ambiental de la humanidad.

Debido a que la comprensión y estudio de la dinámica del plasma en las fulguraciones son un asunto de seguridad nacional y mundial, esta tesis está dirigida al estudio de la causa de etapa de liberación de la energía de una fulguración solar usando simulaciones numéricas con un enfoque magnetohidrodinámico (MHD).

## 1.1 Planteamiento del problema

Se cataloga como fulguraciones solares a las grandes liberaciones de energía ( $10^{28} - 10^{32}$ ) ergios, equivalentes a millones de bombas atómicas de 100 megatones liberadas en cuestión de segundos. Producto de la reconexión magnética de estructuras magnéticas en el sol como: prominencias, sigmoides, etc., cuya energía expulsada, es detectada por telescopios solares como GOES, en cuyas gráficas de flujo de rayos X vs tiempo (Figura 1.1.d), las fulguraciones solares se presentan como grandes picos en el flujo promedio detectado.

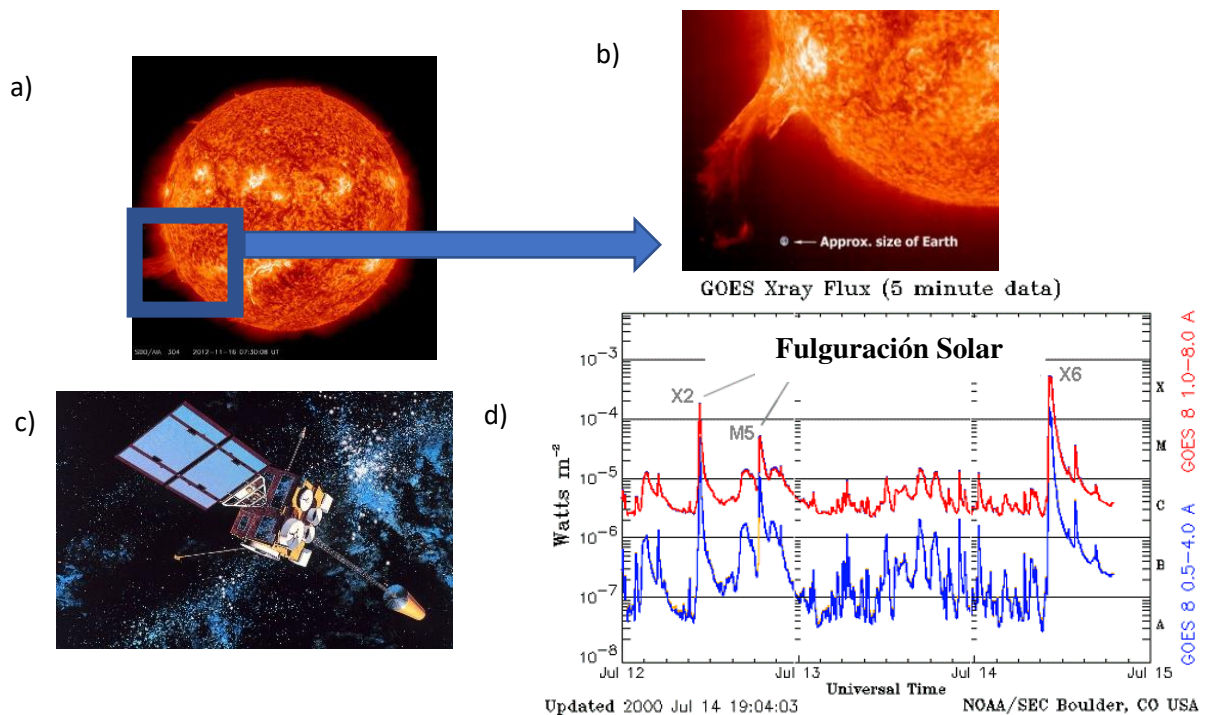


Figura 1.1. Fulguraciones solares

a) Explosión de una Prominencia, ubicada en el sol. b) Liberación de energía, clasificada como fulguración por los telescopios. Fuente:(Garner,2017).

c y d) Las sondas o telescopios detecta valores máximos de flujo (producto de la explosión) a los cuales se catalogan como fulguraciones solares, como en la figura 1d, de flujo de rayos X vs tiempo de la sonda GOES (escala logarítmica), los tres picos en el flujo, son tres fulguraciones detectadas el 14 de julio del 2000.Fuente: GOES-Web.



Las fulguraciones solares presentan tres marcadas etapas: acumulación, liberación y transporte de energía. En la primera etapa la energía se acumula en estructuras magnéticas que contienen plasma (prominencia, sigmoide, etc.), las cuales pueden permanecer estables por horas o meses. Hasta que interactúan o chocan con una segunda estructura magnética (flujo emergente, arcade, etc), generando la reconexión magnética de la primera estructura y desencadenando el inicio de la etapa de la liberación de energía (**reconexión magnética**) (Figura 1.2). Conocer la causa que desencadenó el inicio de esta etapa, es decir la estructura magnética que interactúa con la (prominencia o sigmoide) y las condiciones iniciales del plasma, es complicado, por dos razones principales: las limitaciones instrumentales y las miles de fulguraciones solares detectadas que presentan características particulares y marcadamente diferenciadas. Estas condiciones no ayudan a realizar un pronóstico temprano acertado de la energía liberada de las fulguraciones que llegan hacia la tierra en forma de tormentas geomagnéticas, por lo tanto, no se puede realizar una prevención adecuada generando daños: económicos, sociales, tecnológicos y ambientales a la humanidad. Que en el caso del Perú pueden llegar a ser daños millonarios debido a que no existe ningún protocolo, normas o reglas de prevención ante este hecho.

Por tal motivo la magnetohidrodinámica es una herramienta ampliamente usada para el estudio de las fulguraciones solares, facilitando el conocimiento de la causa que desencadena la el inicio de la etapa de liberación de energía y la dinámica del fluidos de la misma. Por esta razón se utilizará la herramienta mencionada en nuestro caso de estudio seleccionado: fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011, con presencia de la reconexión magnética, sobre la cual no se conoce el tipo de estructura magnética que interactúa con la prominencia y las condiciones en el plasma que desencadenan el inicio de la etapa de liberación de energía (reconexión magnética).

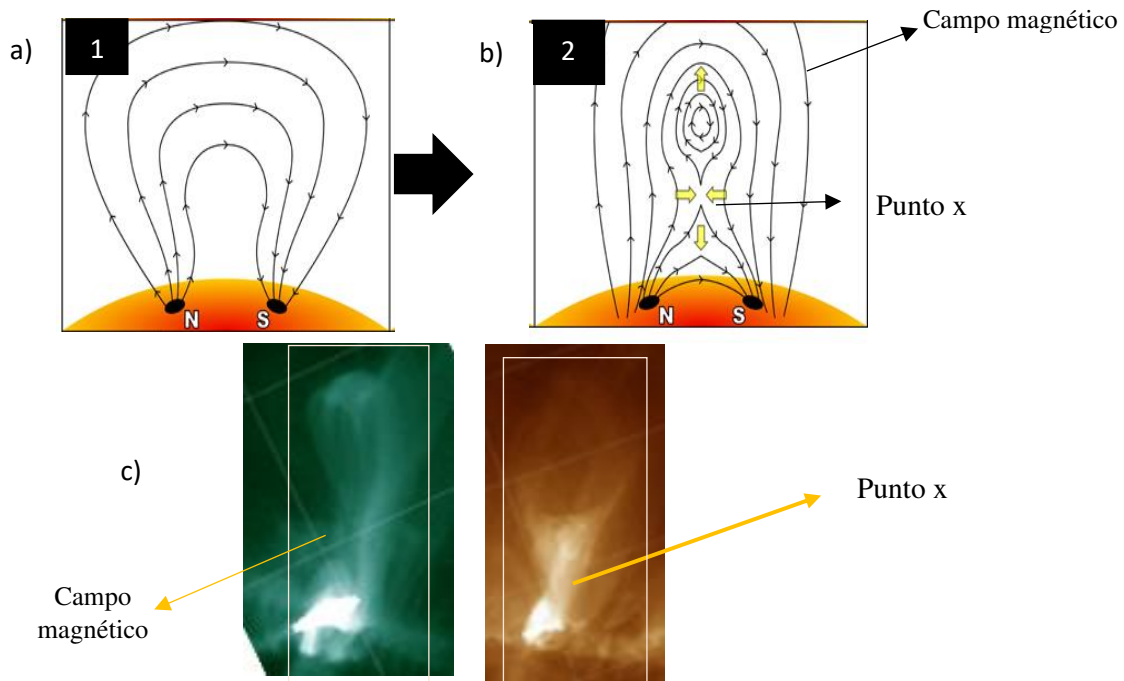


Figura 1.2. Estructura magnética que almacena energía.

a) En una estructura magnética que contiene plasma (prominencia, sigmoide, etc.), se almacena la energía. Fuente: (NASA,2005). b) La estructura magnética empieza a desestabilizarse, a causa de la interacción con **otra estructura magnética** (flujo emergente, arcade, etc) y a cambios de propiedades en el plasma finalmente ocurriendo la reconexión magnética en el punto X Fuente: (NASA,2005).

c) Fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011, donde se observa los campos magnéticos de la prominencia (cuerda de flujo). Fuente: AIA/SDO.

Por lo expuesto anteriormente presentamos la formulación del problema:

### 1.1.1 Formulación del problema

¿Qué estructura magnética y condiciones iniciales en el plasma desencadenan el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011?

#### 1.1.1.1 Problemas específicos

1. ¿Qué criterios se deben aplicar para la selección de la fulguración solar de estudio ?.
2. ¿Cuáles son las características observacionales que describen el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo ?.
3. ¿Qué propiedades del plasma se debe obtener de la simulación numérica que describan la dinámica del fluido del inicio la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar la estructura magnética y las condiciones iniciales en el plasma, que desencadenan el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Definir los criterios para la selección de la fulguración solar de estudio.
2. Encontrar las características observacionales que describen el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011.
3. Estudiar las propiedades del plasma que se obtienen de la simulación numérica para la descripción de la dinámica del fluido del inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011.

## **1.3 Hipótesis**

El flujo magnético emergente (estructura magnética) que interactúa con los campos magnéticos de la prominencia (cuerda de flujo) y los diversos valores que se consideran para las condiciones iniciales de la presión y resistividad, desencadenan el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011.

## 1.4 Justificación e importancia

La justificación de este estudio se basa en el hecho de que, la energía expulsada durante la etapa de liberación de energía de una fulguración solar, produce tormentas geomagnéticas extremadamente peligrosas, generando daños incalculables para el desarrollo económico, social y tecnológico de la humanidad. Por lo que es necesario describir y conocer las causas que desencadenan el inicio de la liberación de energía en cada evento ocurrido, para la construcción de métodos de pronóstico temprano, ya que las fulguraciones detectadas hasta la actualidad son miles y no todos los eventos han podido ser estudiados, así como ocurre en nuestro caso de estudio, “fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011”, sobre la cual no se conoce el **proceso desencadenante** de la etapa de liberación de energía.

Los métodos de pronóstico temprano son una herramienta de protección ante los efectos de las fulguraciones solares, sin embargo, la mayoría de pronósticos están basadas en modelos estadísticos. Es en este punto, donde la mecánica de fluidos del plasma (magnetohidrodinámica) cobra gran importancia, ya que, el desafío de la predicción de estos eventos se puede enfrentar usando la magnetohidrodinámica como lo menciona (kusano,2020), permitiendo la comprensión de los procesos causantes del inicio de la fase de liberación de energía. Por lo que usar la magnetohidrodinámica para estudiar la etapa anteriormente mencionada en un gran número de eventos permitirá la construcción de un pronóstico más acertado basado en este enfoque y por ende, la búsqueda de soluciones para reducir el riesgo de daños a la humanidad. Como lo menciona (Babayev,2002), si la producción de una tormenta geomagnética es detectada a tiempo, entonces se puede advertir la aproximación de este evento con anticipación a las empresas de electricidad, de esta manera ellos podrán tomar acciones de mitigación o varias medidas de control ante el suceso, antes de que se produzcan daños irreparables.

Otra motivación para la elección de este tema de investigación, es que Perú no posee normas o leyes que puedan dar protocolos de actuación ante la llegada de una tormenta geomagnética, sumado al hecho que solo contamos con pocas instituciones dedicadas al estudio del sol. Por lo que el país se encuentra desprotegido y el impacto económico sería de proporciones exorbitantes.

La contribución de este estudio es la búsqueda de la causa que desencadena la etapa de liberación de energía en la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 usando un enfoque magnetohidrodinámico, la cual será comprobada a través de la hipótesis planteada en la sección 1.3. Los resultados de la tesis de desarrollo ingenieril aportarán a la construcción de un pronóstico unificado, ya que los datos obtenidos se sumarán a otras investigaciones, cuyo propósito es conocer y describir las causas del inicio de la etapa de liberación de energía de una fulguración solar.

Por último, esta investigación toma una posición de inicio de línea de investigación en el área de Mecánica de Fluidos del plasma en nuestra escuela.

## **1.5 Metodología**

El proceso que se lleva a cabo en esta investigación es el siguiente:

### **1. Recolección de datos**

Se extrajeron los datos de acceso libre de los telescopios solares como:

- GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite)
- El instrumento The Atmospheric Imaging Assembly, a bordo del telescopio espacial, Solar Dynamic Observatory (AIA/SDO).

Ambos telescopios son proyectos de NASA (National Aeronautics and Space Administration), el primero nos da información del nivel de energía de la fulguración y el segundo de los campos magnéticos y plasma. Para conseguir la información de los instrumentos, se estudiaron las técnicas de extracción de datos solares debido a que cada telescopio tiene diferentes formatos y estructuras de almacenamiento de la información.

## **2. Selección y Descripción del evento**

Para la selección del evento de estudio se realizó los siguientes pasos:

- Se usaron las bases de datos proporcionados por NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Usando como muestra un rango de registros de fulguraciones solares del año 2010-2019.
- Se establecieron los criterios descritos en el capítulo 3 siendo seleccionada la fulguración Solar del 8 de marzo del 2011.
- Se construyeron scripts en Python 3 con estructura de programación orientada a objetos, usando paquetes como: numpy, matplotlib, sunpy y astropy, para el procesamiento de datos extraídos de los telescopios solares.
- Se describió la fulguración seleccionada usando los datos del instrumento The Atmospheric Imaging Assembly bordo del telescopio Solar Dynamic Observatory (AIA/SDO) y los datos de GOES.

## **3. Selección y estudio de Software**

Se seleccionó el software PLUTO usando los criterios mencionados en el anexo D, luego se procedió al estudio del manual, implementando los ejemplos básicos. Cabe mencionar que el código está escrito en C, fortran y la interfaz grafica en Python 2.

## **4. Simulación Numérica**

Los pasos para la realización de la simulación numérica fueron los siguientes:

1. Se determinó el Módulo numérico a usar y sus respectivas dependencias para el estudio dentro del software PLUTO.
2. Se determinó el tamaño de malla, el tamaño de paso, tiempo de simulación, condiciones de borde y dimensiones; todos ellos fueron datos extraídos de las observaciones.
3. Se colocó las condiciones iniciales de campo magnético y flujo emergente (Chen y Shibata,2000), densidad, temperatura, presión, velocidad y resistividad en los archivos.
4. Se realizaron simulaciones en los tres escenarios explicados en el capítulo 4, obteniendo perfiles de presión, velocidad, temperatura y densidad.
5. Se realizó el post procesamiento de datos, con Python 3 y gnuplot, para la visualización y análisis.

## **5. Análisis de resultados**

Se procedió a comparar y analizar los datos obtenidos de los tres escenarios de simulación (capítulo 5), con los datos observacionales de evolución del campo magnético y del plasma, obtenidos del telescopio (AIA/SDO) The Atmospheric Imaging Assembly a bordo del Solar Dynamic Observatory, para comprobar la validez de hipótesis planteada.

## 2 . Capítulo II: Marco Teórico

En el presente capítulo se desarrollarán los antecedentes y los conceptos básicos para el desarrollo de la tesis: el sol. Fulguraciones solares y ecuaciones de magnetohidrodinámica.

### 2.1 Antecedentes

En el año 2000 Chen y Shibata presentaron el artículo científico “An emerging flux trigger mechanism for coronal mass ejections”. En el cual se plantea el uso de las ecuaciones de magnetohidrodinámicas para representar la evolución temporal de la desestabilización del campo magnético de una prominencia/filamento y su reconexión magnética provocada por la emergencia de flujo magnético en la fotosfera. Planteando una configuración magnética inicial (cuerda de flujo) y emergencia de flujo magnético. Basándose en la evidencia observacional de (Feynman y Martin, 1999). La configuración magnética y algunas condiciones iniciales de esta investigación se usarán de base para la presente tesis.

En el año 2011 Shibata, K. y Magara, T presentaron el artículo científico “Solar Flares: Magnetohydrodynamic Processes”, en donde se hace especial énfasis en mostrar los diferentes modelos que explican el movimiento del fluido en las fulguraciones solares (Solar Flare en ingles) y los diferentes procesos magnetohidrodinámicos para la generación de una explosión como: La acumulación de energía, liberación de energía, transporte de Energía. Además de mencionar la morfología de este tipo de fenómenos. Esta investigación es de especial relevancia pues presenta las bases teóricas para el desarrollo de la tesis como; las etapas de fulguraciones solares y su magnetohidrodinámica.

En el año 2012, Su, Y. et al, presentaron el artículo científico “Observations of a Two-Stage Solar Eruptive Event (SEE): Evidence for Secondary Heating”, en este trabajo de investigación se describió las fulguraciones solares M4.4 y M1.4 ocurridas en el suroeste del limbo solar proporcionando una clara evidencia de una fase de calentamiento secundaria. Usaron los datos



de GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), AIA/SDO (The Atmospheric Imaging Assembly / Solar Dynamics Observatory) y RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager). En esta investigación se describe la fulguración solar M4.4 el evento de estudio de la presente tesis, por lo que ha servido para conocer las propiedades del evento descritos desde otro punto de vista.

## 2.2 El sol y su estructura

El Sol, es una estrella de clase espectral G2V (Pitjeva and Standish, 2009). Nuestro astro rey tiene 4.603 miles de millones años, un diámetro aproximado 1.392.000 km, velocidad de escape promedio  $618 \frac{km}{s}$ , cuya luz llega en 8 minutos a la tierra.

El Sol tiene una estructura compleja (Figura 2.1) compuesta por capas, iniciándose por el **núcleo**, cuya región tiene alta presión y elevada temperatura, en esta capa se llevan a cabo las reacciones nucleares que transforman hidrógeno en helio (fusión nuclear) liberando energía suficiente para mantener el brillo actual del Sol por miles de millones de años, esta energía se fuga continuamente hacia afuera de manera muy suave a través de la **zona de radiación**, para que después en la siguiente capa, la **convección** sea el medio dominante del transporte de energía hacia el exterior. Finalmente las ultimas capas son: **Fotosfera, Cromosfera y Corona**. (Priest,2014).

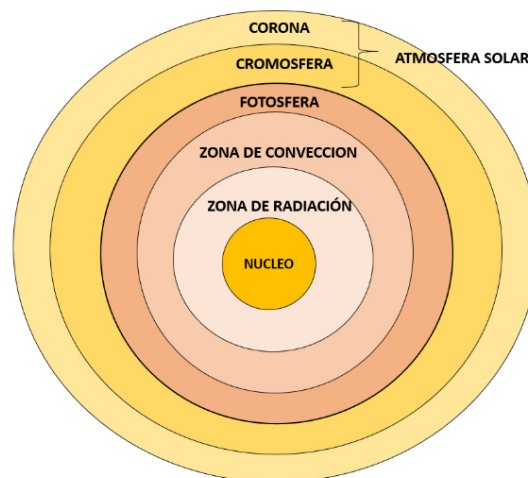


Figura 2.1. Estructura solar.

El núcleo, la zona de radiación, zona de convección, la fotosfera, cromosfera y corona.

Fuente: Adaptado de (Priest,2014)

### 2.2.1 La superficie solar: Fotosfera

Esta zona es importante debido a que la fotosfera es la delgada capa superficial visible del Sol, con un espesor aproximado de 100 km, en esta región el sol emite gran cantidad de luz visible, dándole una coloración verde. En esta capa ocurre el proceso de emergencia de flujo.

### 2.2.2 La atmosfera solar: la cromosfera y Corona

La atmosfera está compuesta por Cromosfera y Corona, sobre la cual (Wedemeyer,2018) menciona que la cromosfera es la capa atmosférica compuesto de hidrógeno principalmente en forma neutra, asimismo (Zell,2017), indica que esta capa se encuentra aproximadamente entre 250400 km y 2100 km sobre la superficie solar (la fotosfera). Y que su temperatura varía aproximadamente entre 4000 °K en la parte inferior y 8000 °K en la parte superior.

Otra capa que conforma la atmosfera solar es la corona, considera atmósfera exterior caliente e ionizada del sol. Gran parte del plasma de la corona está limitado por el campo magnético solar en forma de bucles cerrados que emergen de la fotosfera y estructuras retorcidas, además, parte del plasma coronal se expande hacia el espacio interplanetario como un flujo de salida supersónico conocido como el viento solar (Cranmer y Winebarger,2019), la corona también esta conformada por regiones de campo magnético "abierto" que forman la heliosfera.

Las capas mencionadas son importantes ya que en ella se generan las fulguraciones solares.

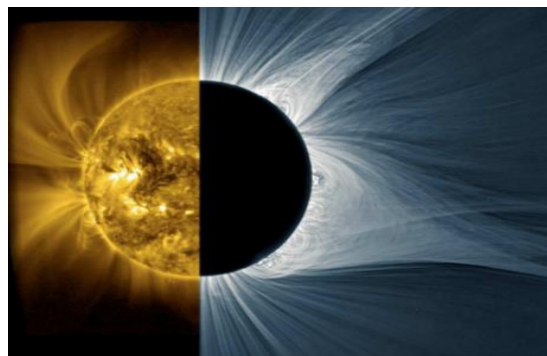


Figura 2.2. Vistas complementarias de la corona solar.  
Izquierda: imagen de emisión ultravioleta extrema del SWAP. Derecha: banda visible dispersa luz del eclipse solar total del 21 de agosto de 2017. Fuente: (Cranmer & Winebarger,2019)

## 2.3 Fulguraciones solares

La relevancia del estudio de las fulguraciones solares radica en que son grandes liberaciones de energía que aparecen como máximos en el gráfico de GOES de rayos X (Figura 2.3 b). Estos máximos en el flujo promedio, representan fenómenos explosivos ocurridos en la atmosfera solar, desde reconexión magnética en estructuras magnéticas compuestas de plasma (prominencias o sigmoides) hasta cambios bruscos de la configuración magnética. Sea cual sea el fenómeno explosivo ocurrido, este puede liberar hasta aproximadamente entre  $10^{28} - 10^{32}$  erg, energía liberada equivalente a millones de bombas atómicas de 100 megatones en cuestión de segundos. El tamaño espacial de una fulguración solar depende del fenómeno explosivo ocurrido y por ende afecta la duración de una explosión aproximadamente entre  $10^3 - 10^4$  segundos y la cantidad de energía liberada. (Shibata y Magara,2011)

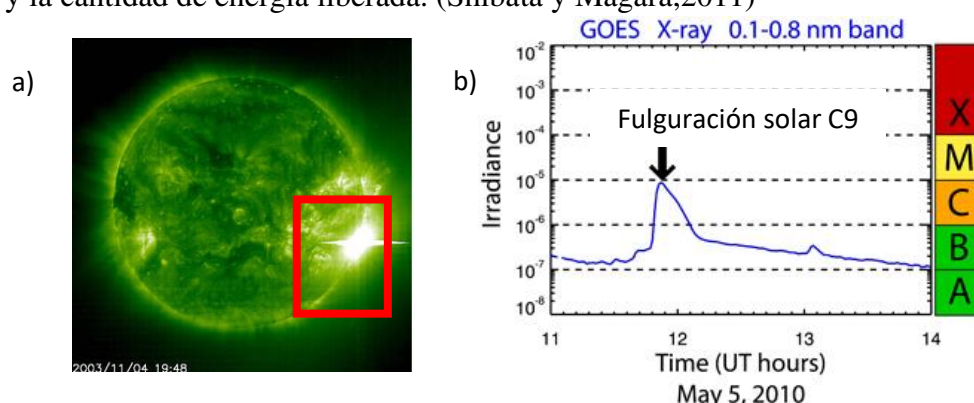


Figura 2.3. Fulguración solar.

- a) Fulguración solar (recuadro negro) del 4 de noviembre de 2003. SOHO. Fuente: (Garner,2020).  
 b) Fulguración solar en grafico de rayos X GOES. Fuente: (GOES)

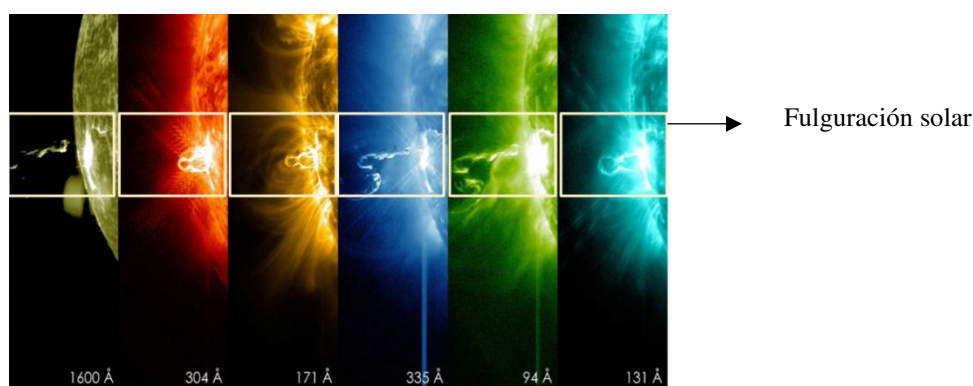


Figura 2.4. Fulguración solar emitida en diferentes bandas del espectro electromagnético. El 24 de febrero de 2014, el sol emitió una fulguración solar relacionada con la explosión de campos magnéticos. Se puede ver material solar caliente flotando. Fuente: (Rob Garner,2014).

## 2.4 Clasificación de Fulguraciones Solares

La clasificación mas usada por la comunidad científica es empleada desde 1970, y está basada en la producción total integrada de rayos X suaves detectados desde el Sol, por satélites en órbita terrestre, como GOES-15, en la banda de 1–8 Å °. El tamaño de la Fulguración solar depende de la intensidad máxima (escala logarítmica, ( $\frac{erg}{cm^2s}$ )), cómo se observa en la Tabla 2.1, donde las letras A, B, C, M y X representan intensidades crecientes en incrementos de orden de magnitud. Por ejemplo la Fulguración solar B tiene una intensidad máxima de  $10^{-4} \text{ erg/cm}^2s$ , pero si esta intensidad máxima pasa a ser  $3 \times 10^{-4} \text{ erg/cm}^2s$ , la fulguración solar se designa B3.(Cliver, 2000). **Por lo tanto esta clasificación nos ayuda a conocer el nivel de energía liberada, pero no indica que fenómeno explosivo ocurrió en el sol, que produjo ese nivel de energía. Para esto es necesario usar datos de otras sondas como AIA/SDO o STEREO.**

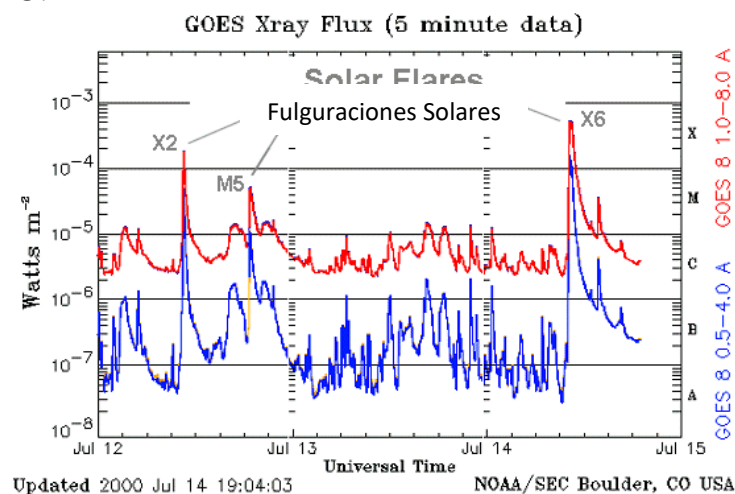


Figura 2.5. Clasificación de las fulguraciones solares.

La Figura muestra erupciones solares detectadas por satélites NOAA en julio de 2000.Fuente: NOAA

Tabla 2.1.Clases de fulguraciones

Clase	Intensidad ( $ergcm^{-2}s^{-1}$ )	$I(Wm^{-2})$
A	$10^{-5}$	$10^{-8}$
B	$10^{-4}$	$10^{-7}$
C	$10^{-3}$	$10^{-6}$
M	$10^{-2}$	$10^{-5}$
X	$10^{-1}$	$10^{-4}$

Clasificación en escala logarítmica. Fuente:( Su .Yingna,2007)

## ETAPAS DE FULGURACIONES SOLARES

El proceso de evolución de una fulguración solar se divide en tres marcadas etapas: acumulación, liberación y transporte de energía.

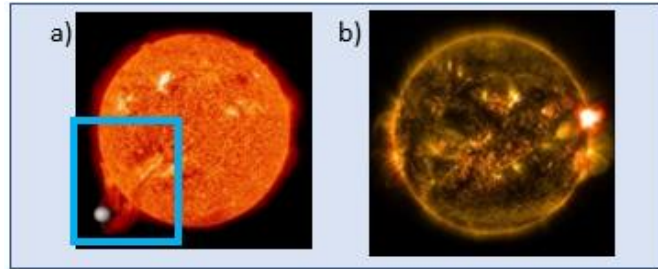


Figura 2.6. Prominencias.

a) Comparación del tamaño de una prominencia (color naranja) con júpiter y tierra imagen tomada por SDO /AIA el 06/12/2011. b) El sol, las partes más brillantes son fulguraciones solar. Fuente: (Garner, 2017)

### 1. ETAPA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA

En esta primera etapa, La energía se acumula en estructuras magnéticas compuesta de plasma. (sigmoides, prominencia o filamentos, etc.)



### 2. ETAPA DE LIBERACION DE ENERGÍA

La energía acumulada en la primera etapa, se libera mediante reconexión magnética. Cuando las estructuras magnéticas que contiene la energía, se desestabilizan (figura 2.8) producto de diferentes tipos de interacción con el medio.



### 3. ETAPA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA

La energía liberada de la anterior etapa, en forma de partículas y plasma eyectado (Eyecciones de masa coronal), viaja hacia el medio interplanetario en dirección a la tierra.

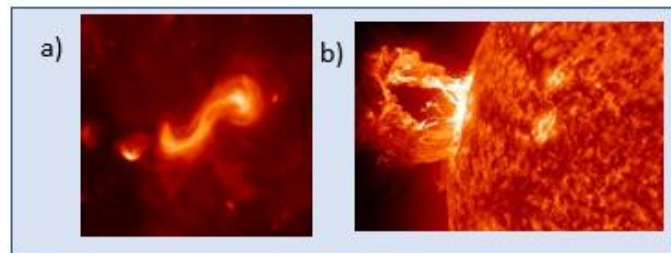


Figura 2.7. Sigmoide y Prominencia

a) Sigmoide (Savcheva, 2015) b) Prominencia (SDO/AIA 16/04/2012). Fuente: (Fox, 2017)

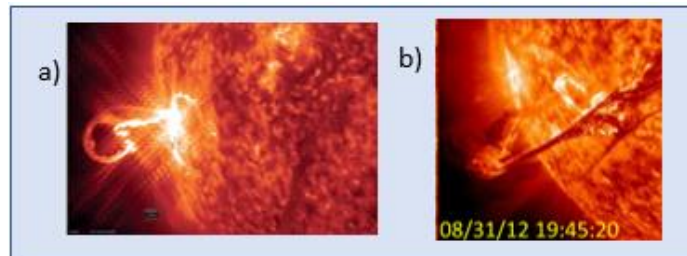


Figura 2.8. Explosión de prominencias.

Fuente: (Strong, 2017) y (Wood et al, 2016)

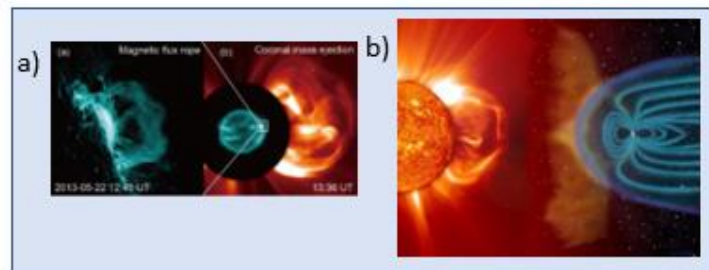


Figura 2.9. Etapa de transporte de energía.

a) Eyección de masa coronal Fuente: (Cheng et al, 2017)

b) Energía en dirección a la tierra. Fuente: (Blanchett et al, 2018)

### **2.5.1 Etapa de Acumulación de Energía**

Sobre la etapa de acumulación de energía Shibata y Magara (2011) mencionan que:

El campo magnético que proporciona la fuente de energía de una Fulguración solar, originalmente se encuentra debajo de la superficie solar (Zwaan, 1985), después de viajar a través de la zona de convección. Mientras viaja a través de esta región, el campo magnético está rodeado por un plasma de alta presión que realiza movimientos convectivos (Parker, 1979) por lo que el campo magnético puede tomar la forma de un tubo de flujo delgado con algo de giro (Fan, 2008). Cuando un tubo de flujo de este tipo emerge a la superficie, la presión del gas de fondo disminuye abruptamente, por lo que el campo magnético se expande rápidamente. El campo magnético emergente finalmente llena un gran volumen en la atmósfera solar y forma una estructura magnética. El campo magnético pierde la energía magnética originalmente almacenada en el tubo de flujo a través de este proceso, aunque parte de la energía magnética permanece en la estructura magnética como corriente eléctrica alineada con el campo que no produce la fuerza de Lorentz. Por lo tanto, la corriente alineada en el campo se almacena como energía libre a menos que se disipe. La corriente alineada con el campo también introduce distorsión en la estructura magnética (Sakurai, 1979), que se observa como una arcada cortada y/o una cuerda de flujo retorcida. La formación de una estructura magnética distorsionada es importante para comprender el estado que conduce al inicio de una Fulguración solar. (pag,8)

Las estructuras magnéticas de plasma que almacenan la energía de la fulguración solar, anteriormente mencionadas son también llamadas “precursores”. De todos los tipos de estructuras que se encuentran en esta zona, se estudiara la prominencia.



### 2.5.1.1 Prominencia

A esta estructura compuesta de plasma, se le denomina prominencia al estar ubicada en el borde solar y filamento cuando se observa contra el fondo solar apareciendo en forma de línea oscura.

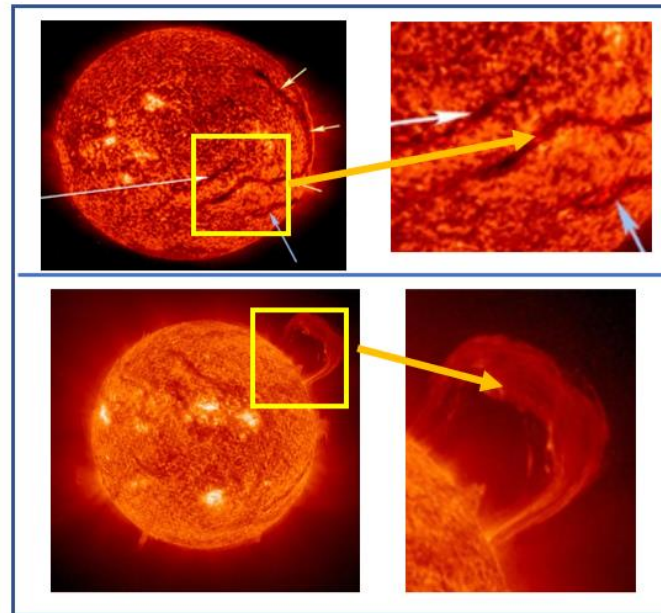


Figura 2.10. Filamento o Prominencia.

- a) Filamento, se observa que poseen una forma de tubo alargado. Fuente: (Hill, 2004)
- b) Imagen del Telescopio Ultravioleta de Imágenes Extremas (EIT) de una enorme prominencia en forma de mango tomada el 14 de septiembre de 1999. Fuente: (UCAR, 2012)

Una prominencia está compuesta de un plasma relativamente frío con  $T \sim 10^4$  K, flota en la corona que está ocupada por un plasma mucho más caliente con  $T \geq 10^6$  K. La explosión de una prominencia sugiere que se produce cierta desestabilización en su estructura magnética que la contiene. Dado que una prominencia se forma en una región coronal de bajo beta (presión magnética  $>$  presión de gas), las principales fuerzas que causan dicha desestabilización son: La fuerza de gradiente de la presión magnética, la fuerza de tensión magnética y la fuerza gravitacional. Por lo tanto, es importante saber cómo estas tres fuerzas mantienen el equilibrio durante la fase pre-eruptiva de una prominencia. (Shibata & Magara, 2011).

Las observaciones han revelado varias características estructurales de la prominencia, esta tiende a formarse por encima de una línea de inversión de polaridad (PIL) en la fotosfera (Figura

2.11), que separa una región de polaridad magnética positiva de una región de polaridad magnética negativa.

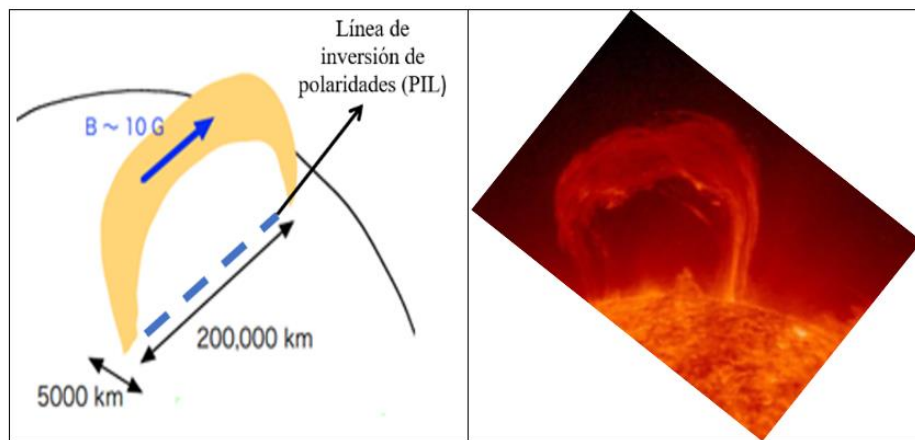


Figura 2.11. Morfología de una prominencia.

Morfología de una prominencia, se observa que poseen dimensiones del orden de kilómetros y una forma casi arqueada. Fuente:(Magara,2020)

### 2.5.1.2 Cuerda de Flujo

La configuración de un campo magnético de una prominencia es llamada cuerda de flujo, es importante puesto que diferencia el plasma de una prominencia de su plasma coronal circundante. La Cuerda de flujo (Figura 2.12 y 2.13) es una estructura en 2D propuesta (Aly 1991; Sturrock 1991), Low & Smith (1993) y Low (1994). y posteriormente comprobada por observaciones de la sonda SOHO/LASCO desde el año 1997 hasta la actualidad.

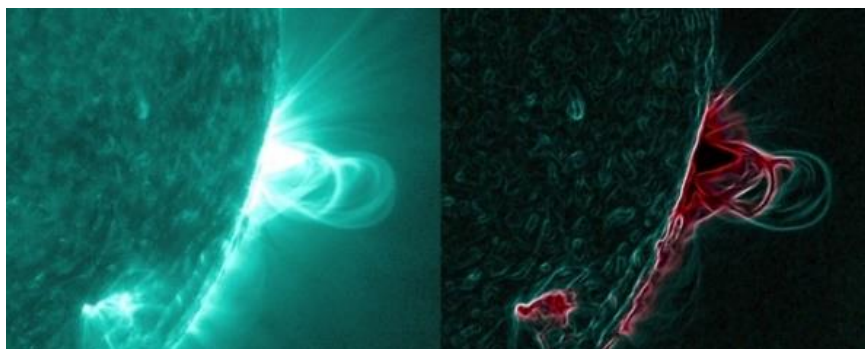


Figura 2.12. Cuerda de flujo.

Cuerdas de flujo en el sol, capturados por el Observatorio de Dinámica Solar de la NASA el 18 de julio de 2012.Fuente: (Fox,2013)



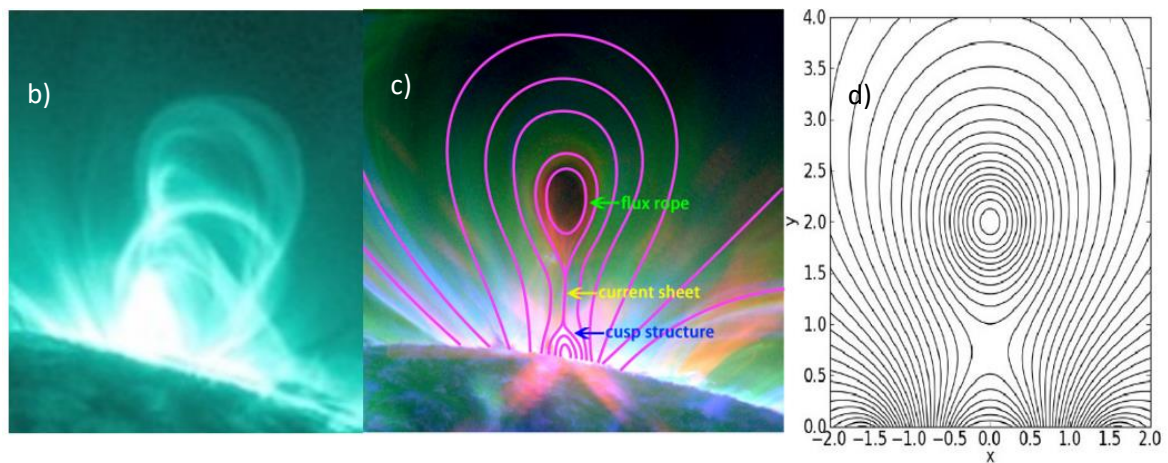
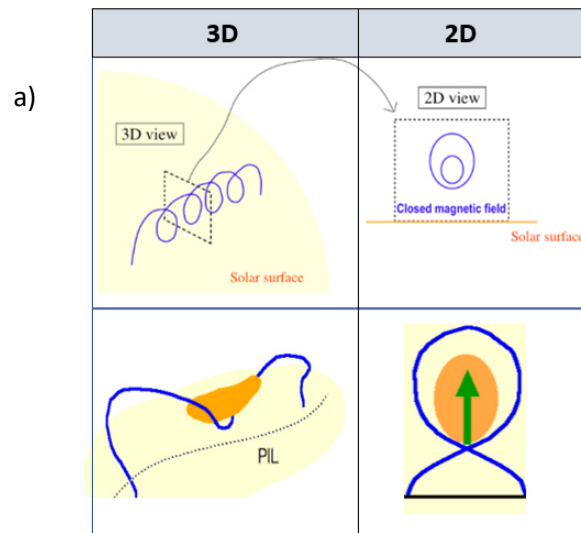


Figura 2.13. Cuerda de Flujo magnética en diferentes perspectivas.

a) En la figura se presenta la cuerda de flujo en 2D y 3D, donde Las líneas azules representan el campo magnético circundante y la prominencia en color naranja. Fuente: (Magara,2011). b) De izquierda a derecha Cuerda de flujo capta por SDO/AIA el 18/07/2012. c) Cuerda de flujo asociada a la fulguración x8.2. Fuente:(Yan et al,2018). d) Cuerda de flujo simulada. Fuente:(Chen y Shibata,2000)

### 2.5.1.3 Origen de los componentes del campo total( *Cuerda de flujo y flujo emergente*)

En la siguiente sección se menciona algunas hipótesis y modelos que describen el origen de los componentes del campo total (Cuerda de flujo y flujo emergente) durante la fase de acumulación de energía de la fulguración solar. Cabe mencionar que esta fase esta fuera de los límites de la simulación y objetivo de estudio, que es la fase de liberación de energía.

### 2.5.1.3.1 *Nacimiento de una cuerda de flujo en una prominencia*

Se han realizado extensos estudios teóricos del origen de la cuerda de flujo, (Low&Hundhausen,1995) y (Low, 1996) sugieren que un tubo de flujo retorcido emerge a través de la flotabilidad magnética para formar una cuerda de flujo sobre la superficie, dentro de la cual se forma una prominencia (Figura 2.14.a ). (Van Ballegooijen y Martens, 1989) presenta un resultado que muestra que los flujos cortantes seguidos de flujos convergentes hacia la línea de inversión de polaridad provocan una reconexión en la superficie (denominada 'cancelación de flujo'), que crea una cuerda de flujo retorcida dentro de la cual se forma una prominencia (Figura 2.14.a ). Por otro lado, recientemente, (Magara, 2007) muestra que la aparición de un **tubo de flujo retorcido** que se ondula a lo largo del eje del tubo reproduce naturalmente las características estructurales observadas de la cuerda de flujo y otros campos magnéticos que la rodean en 3 dimensiones ( Figura 2.14.b ). En este caso las líneas de campo cercanas al eje del tubo (líneas de campo internas) forman el cuerpo principal de una prominencia. (Shibata &Magara,2011).

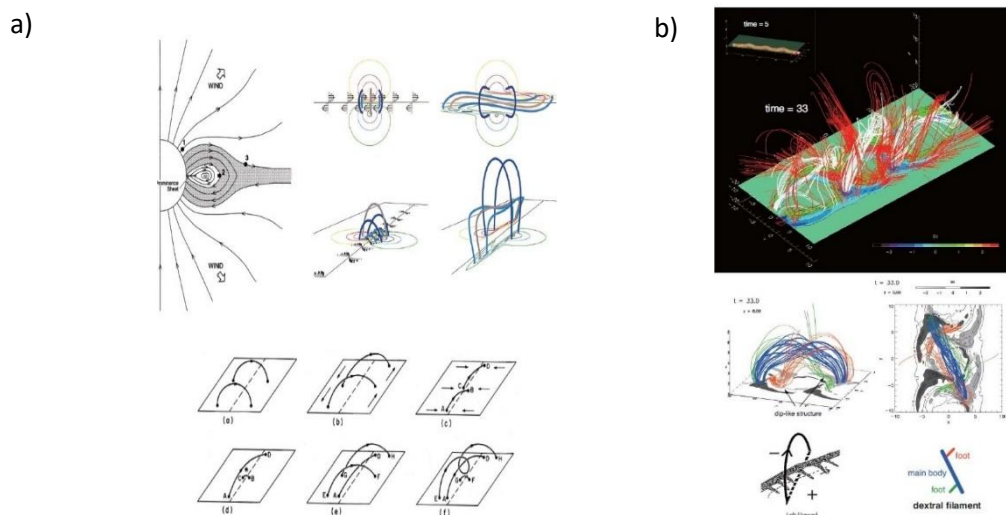


Figura 2.14. Nacimiento de la cuerda de flujo.

a) Posible estructura magnética de una prominencia en 3 dimensiones, formado a través de la aparición de un tubo de flujo retorcido. b) El panel superior muestra estados previos y posteriores a la emergencia. El tubo de flujo ondula a lo largo del eje cuando emerge. Fuente:(Shibata & Magara,2011).

#### 2.5.1.3.2 *Flujo emergente secundario*

La generación este campo magnético atmosférico solar y de otros de su tipos se encuentra muy por debajo de la superficie solar entre la zona de convección y la zona radiativa en una capa llamada **tacoclina** (ubicada en aproximadamente 0,7 de radio solares). Allí, la rotación diferencial del sol transforma parte de la energía cinética global de la rotación solar en energía magnética mediante procesos de **dínamo solar**. La teoría del dínamo predice que la intensidad del campo magnético en esa región puede llegar a  $10^5$  Gauss ( $\sim 10$  Tesla). La rotación solar estira el campo magnético para que adopte la forma de un toro en las latitudes tropicales (zonas reales) con **tubos de flujo** magnético tensos y retorcidos. El mecanismo de activación que permite que los tubos de flujo se eleven hacia la superficie solar aún no está claro (pueden estar involucradas inestabilidades flotantes) pero generalmente se acepta que el proceso de emergencia es impulsado por la **flotabilidad**. La flotabilidad aparece debido a que los tubos de flujo magnético, al estar en equilibrio mecánico con su entorno circundante pero con una presión magnética mayor, tienen una densidad de plasma más baja. (Schmieder and Pariat, 2007).

### 2.5.2 Etapa de Liberación de Energía

Dado que la corona se llena con un medio altamente conductor, habitualmente es ineficiente disipando la corriente eléctrica, esto indica que la energía magnética tiende a almacenarse en la corona sin ninguna disipación fácil y continua de la corriente eléctrica. Entonces surge una pregunta importante sobre **cómo liberar la energía magnética en la corona**, de lo contrario, se acumularía una enorme cantidad de energía magnética en la misma. Uno de los escenarios posibles es que la energía magnética se libera a través de la disipación de la corriente eléctrica en una región delgada, en forma de lámina, donde se mejora la densidad de corriente, que se denomina hoja de corriente durante una fulguración solar. Esto se acompaña de la reconexión

del campo magnético que convierte la energía magnética no solo en energía térmica sino también cinética. (Shibata y Magara,2011)

### 2.5.2.1 Reconexión magnética

La reconexión magnética es la ruptura y reincorporación de líneas de campo magnético en un plasma altamente conductor (Murphy,2014) el cual ocurre durante la fase de liberación de energía de la fulguración solar y en otros procesos de plasma. La reconexión magnética cambia la configuración del campo magnético (topología de línea de campo) en una estructura magnética, destruyendo el equilibrio de fuerzas para impulsar una evolución global de la estructura. Este fenómeno es considerado como principal motor que permite la rápida liberación de la energía magnética acumulada en la corona, a través de la radiación, conducción térmica, las partículas de alta energía y burbujas de plasma (Shibata and Magara,2011), convirtiendo energía magnética a energía cinética y energía térmica. Este fenómeno permite una liberación de energía eficiente dentro de fenómenos solares, de generación de energía nuclear y astrofísicos.

Hay varios efectos importantes de este proceso local: (Priest &Forbes,2000)

- I. Se produce cambios dentro de la topología global (geometría de los campos) y la conectividad de las líneas de campo magnético. Estas líneas de campo opuestas, en un inicio separadas y paralelas empiezan a dirigirse a un punto de intersección también llamado punto nulo o X como se observa en la figura 2.15, cabe mencionar que antes de la reconexión el punto A está conectado al punto B y el punto C al punto D por ser paralelas. En este proceso se afectan las trayectorias de partículas rápidas y conducción de calor, ya que estos se dirigen principalmente a lo largo de las líneas de campo magnético.

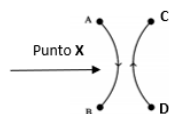


Figura 2.15. Líneas de campo magnético dirigiéndose al punto nulo.  
Las líneas se encuentran paralelas es decir el punto A y B está interconectadas. Fuente; (Priest &Forbes,2000)

- II. Se forma una region rectangular alrededor del punto nulo, llamada hoja de corriente (figura 2.16) en donde al producirse la reconexion magnetica en el punto nulo o X. La energía magnética se convierte en calor y energía cinética.

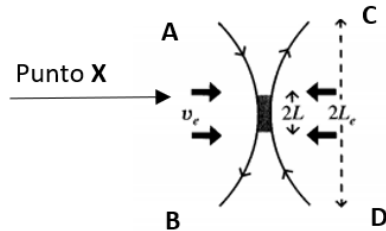


Figura 2.16. Hoja de corriente. Fuente: (Priest &Forbes,2000)

- III. Se produce la reconexion magnetica, rompiendose las lineas de campo magnetico y volviendo a reconectar en el punto nulo o X. En este proceso A y B rompen su conexión al mismo tiempo que C y D luego, los puntos A y C se reconectan al igual que los puntos B y D. Debido a este proceso se crean grandes corrientes eléctricas y campos eléctricos, expulsando plasma y ondas, lo que libera grandes cantidades de energia.

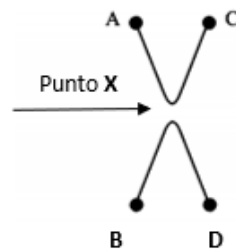


Figura 2.17. Hoja de corriente evolucionando. Fuente: (Priest &Forbes,2000)

Las distintas fases de la reconexión se resumen en el grafico inferior:

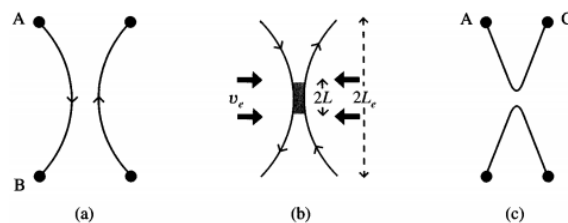


Figura 2.18. Líneas de campo magnético en la reconexión magnética.  
(a) Antes de la reconexión (b) Durante la reconexión (c) Después de la reconexión.  
Fuente: (Priest &Forbes,2000).

La reconexión magnética, es la manera por la cual la corona libera energía produciendo las fulguraciones solares, convirtiendo energía magnética a cinética y acelerando partículas. La secuencia de reconexión en la atmosfera solar se muestra en la figura 2.19, donde en la secuencia 1 y 2, se observa un bucle magnético encima de la fotosfera aumentando su tamaño. En la secuencia 3 y 4 las líneas de campo magnético paralelas que conforman el bucle se empiezan a juntar en punto X, formando alrededor de ella una área de forma casi rectangular llamada hoja de corriente, teniendo como forma un cuello de embudo. Finalmente, en la secuencia 5 y 6, las líneas de campo magnético se cortan y se reconectan en el punto X produciéndose la reconexión magnética.

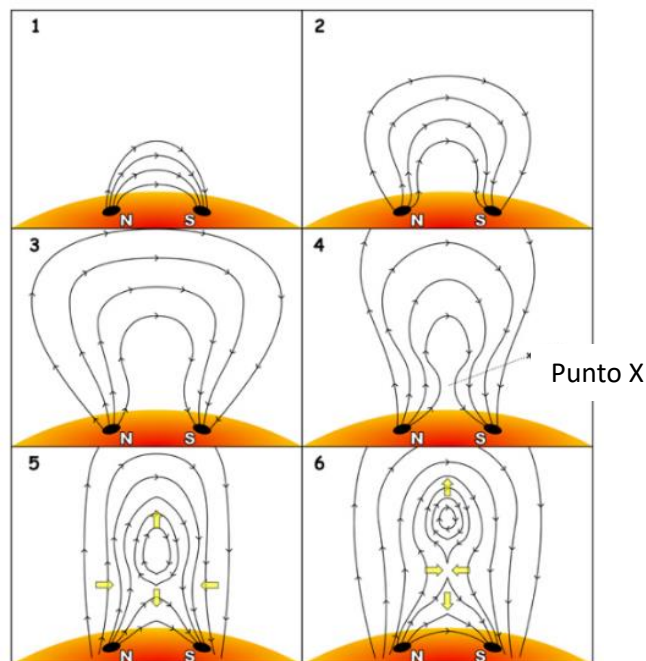


Figura 2.19. Secuencia de reconexión en la atmosfera solar.  
Fuente: (NASA,2005)

### **Puntos nulos y hojas de corriente**

Los puntos neutros o nulos son ubicaciones donde el campo magnético desaparece, son una característica común de campos magnéticos que contienen múltiples fuentes (por ejemplo, el campo formado por dos barras de imanes). Un punto neutral puede ocurrir si el medio magnetizado es un plasma conductor o un gas neutro. (Priest &Forbes,2000).

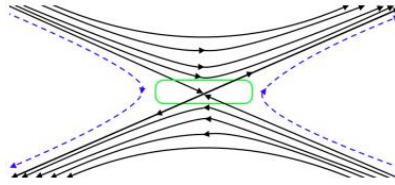


Figura 2.20. Ubicación del punto X.  
La zona verde es la ubicación del punto X, donde ocurre la reconexión.  
Fuente: ( Jafari & Vishniac, 2018)

Una hoja de corriente es una capa delgada que transporta corriente eléctrica a través del cual el campo magnético cambia en dirección y magnitud o ambos. Asimismo, la hoja de corriente puede solo existir en un medio conductor como un plasma. (Priest & Forbes, 2000).

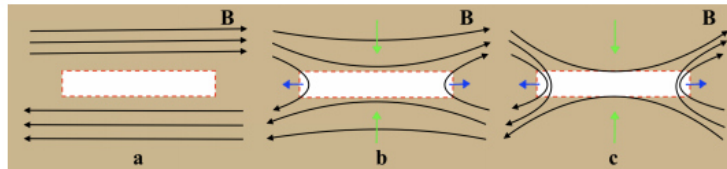


Figura 2.21. Hoja de Corriente.  
La zona de geometría rectangular blanca, es considerada la hoja de corriente.  
Fuente: ( Jafari & Vishniac, 2018)

### 2.5.3 Etapa de Transporte de Energía

La energía liberada por la reconexión magnética se transporta de diferentes maneras, como radiación, conducción térmica, eyección de masa, propagación de ondas y generación de flujo de partículas de alta energía. El proceso de transporte de energía afecta significativamente a la atmósfera solar, lo que hace que la fase principal de una fulguración solar sea rica en eventos dinámicos como la formación de descargas, inyección de plasma, chorros de plasma, evaporación cromosférica y la aceleración de partículas cargadas. (Shibata y Magara, 2011).

#### 2.5.3.1 Expulsión Masiva

La reconexión magnética convierte principalmente la energía magnética en energía térmica y cinética, y en parte la energía cinética se utiliza para la expulsión de plasmoides, es decir plasma que se expulsa fuera de la atmosfera solar en dirección de la tierra. Además del plasma también

se eyectan partículas de altísima energía que pueden causar graves efectos en la tecnología y a la humanidad, como se describe en la siguiente sección.

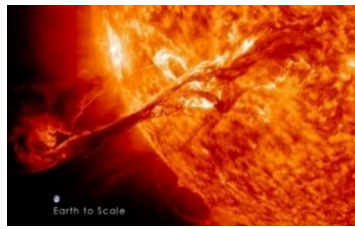


Figura 2.22. Imagen de Eyecciones de Masa Coronal.  
Fuente: ESA/NASA - SOHO/LASCO/EIT.

## 2.6 El efecto de las Fulguraciones solares sobre el clima espacial y la humanidad

Las fulguraciones solares (FS) pueden causar efectos altamente peligrosos para la tierra, pues durante el proceso de reconexión puede producir tanta energía como mil millones de bombas de hidrógeno, que dirigida hacia la tierra genera tormentas geomagnéticas de larga duración pudiendo ocasionar daños a los satélites, los sistemas de comunicaciones, en la salud humana (por la alta radiación) e incluso las tecnologías terrestres y las redes eléctricas. En las siguientes secciones hablaremos ampliamente de estos efectos:

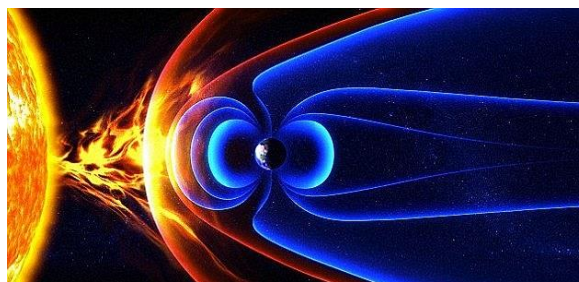


Figura 2.23. Relación-Tierra sol.

Una ilustración, de la tierra y el sol, se observa que a pesar de poseer una magnetosfera(líneas en color azul) que protege del impacto de los fenómenos eruptivos solares, la tierra se encuentra a merced de las fulguraciones solares cuyas intensidades y efectos pueden ser letales. Fuente: (Zolfagharifard,2014).

### 2.6.1 Algunos eventos históricos de Fulguraciones solares

A continuación, se mostrará algunas tormentas magnéticas históricas producidas por FS:

La Fulguración solar del 1 de septiembre de 1859, generó tormentas geomagnéticas excepcionales (Muller,2014), registrando auroras boreales en latitudes bajas de la tierra siendo



observadas en todo el mundo (Figura 2.24). Este evento fue observado e informado por dos científicos: Carrington (1859) el cual menciona en su artículo, que el brillo que observó era igual a la de la luz solar directa, afirmación que fue corroborada por Hodgson (1859) el cual menciona que le sorprendió la aparición de una estrella de luz más brillante que superficie del sol. Por otro lado esta tormenta magnética, produjo muchos incendios en Estados Unidos y Europa. (Tsurutani et al, 2003). Además de numerosos fallos de Telégrafos a nivel mundial, hay que enfatizar que en aquella época la tecnología no estaba lo suficientemente desarrollada, por lo que los efectos no fueron de mayor impacto como lo que ocurriría en la actualidad.

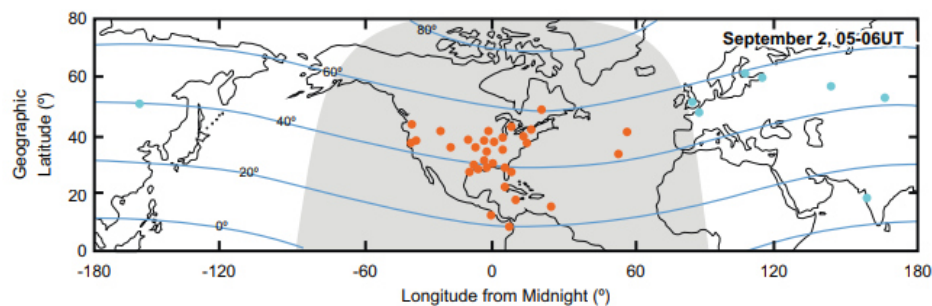


Figura 2.24. Tormenta Carrington.

(Arriba) Lugares desde los cuales se observaron auroras (puntos naranjas) o se realizaron mediciones geomagnéticas (puntos azules claros). Fuente: (Cliver et al, 2013)

En agosto de 1972, una fulguración solar provocó cortes de energía y perturbaciones eléctricas en todo Illinois-USA. (Simons,2017).El mismo evento llevó a AT&T a rediseñar sus cables de alimentación de largo alcance además provocó la explosión de un transformador de 230 000 voltios ubicado en el British Columbia Hydro and Power Authority ( Kashlinsky and Odenwald, 2000).

El 13 marzo de 1989, otra gran tormenta solar causada por una fulguración solar, destruyó partes de la red eléctrica de Canadá, esto provocó un gran apagón en las regiones afectadas que dejó a las personas sin electricidad durante aproximadamente nueve horas, dañó los sistemas de transmisión de energía eléctrica de la estación generadora de “Hydro Québec” e incluso derribó algunos transformadores de energía en Nueva Jersey. (McFadden,2020)

Las fulguraciones solares del 5 y 6 de diciembre de 2006, activaron un CME (Eyección de Masa Coronal) que interfirió con el envío de señales de GPS a receptores terrestres. (Fox,2017).

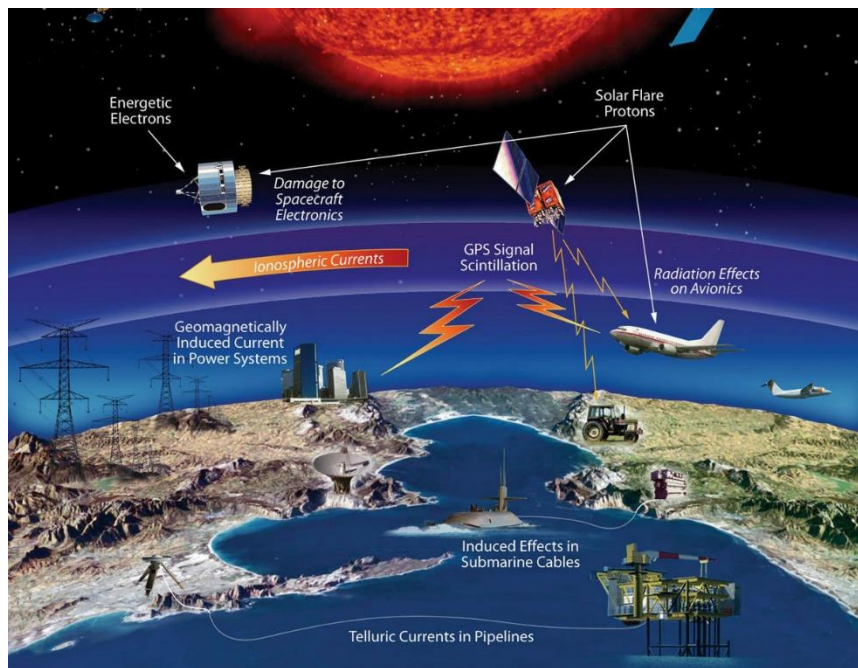


Figura 2.25. efectos de las fulguraciones solares sobre tierra.  
Fuente: Garner,2020.

### 2.6.2 Efectos en el sector energía

El sector de la energía eléctrica se ve afectado principalmente por las corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC), las cuales expulsan a los transformadores de sus dominios lineales y generar calor disipativo, esto puede dañar los transformadores y generar que los sistemas de protección se disparen y pueden afectar la red de distribución de energía, llegando incluso a inutilizarla. Este fenómeno puede ser mitigado por los operadores de la red eléctrica, si conocieran a tiempo la llegada del evento, optimizando el diseño, introduciendo equipo de protección, redistribuyendo y cambiando los recursos de generación de energía. (Schrijver et al, 2015)

### 2.6.3 Efectos en las telecomunicaciones

Las fulguraciones solares generan cambios en la densidad de la ionosfera a través de un fuerte acoplamiento en la magnetosfera y cambios termosféricos impulsados por los desprendimientos

de plasma de las fulguraciones solares, afectando los servicios de posicionamiento y navegación como el GNSS (Sistema Global de Navegación). Se estiman errores de rango ionosférico de hasta 100 m en una sola frecuencia, estos errores pueden mitigarse en gran medida mediante modelos ionosféricos adecuados, o más exactamente por región y/o mapas globales del contenido total de electrones (TEC). Además de producir error en las comunicaciones telefónicas, los cambios bruscos de la densidad de plasma afectan peligrosamente la medición del posicionamiento preciso para la seguridad y navegación (aviones, barcos, etc.), afectando la trayectoria del viaje y por lo tanto la seguridad de los pasajeros. Por lo tanto, burbujas de plasma e irregularidades de densidad electrónica a pequeña escala (conocidas como turbulencia de plasma) puede causar fuertes fluctuaciones en la señal, amplitud y fase que se llaman centelleos de radio; el centelleo de fase grave incluso puede causar la pérdida del bloqueo de fase de la señal (Schrijver et al, 2015).

## 2.7 Ecuaciones básicas de Mecánica de Fluidos

### 2.7.1 Conservación de la masa

La ley de conservación de la materia se cumple con independencia de la naturaleza del fluido o de las fuerzas que actúen sobre el mismo. Esto implica que a lo largo de todo un fluido la masa no se destruye ni se genera en ningún punto. Matemáticamente esta ley de conservación se expresa, en su forma diferencial, de la siguiente manera (Cavada,2015).:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $\vec{v}$  la velocidad del fluido en un punto (x; y; z) del espacio para un instante de tiempo  $t$ . El primer término de la expresión anterior representa la variación de masa por unidad de volumen y unidad de tiempo en cierto punto del espacio. Y el segundo término hace referencia a la variación de velocidad de entrada y de salida de la materia en el sistema (Cavada,2015).

### 2.7.2 Ley de conservación de cantidad de Movimiento

De las leyes de movimiento de Newton, se sigue la ley de conservación del impulso. Eso establece que el cambio en el tiempo del impulso de un dominio cerrado debe ser igual a las fuerzas externas sobre el dominio (Schafelner, 2016).

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = 0 \quad (2)$$

### 2.7.3 Ecuación de Navier-Stokes

Esta ecuación parte de la ecuación del movimiento añadiendo el término de los efectos de la fuerza de viscosidad por Claude-Louis Navier en 1821 y explicado físicamente por George Gabriel Stokes en 1845 (De la torre, 2009).

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}_{ext} \quad (3)$$

La ecuación de Navier-Stokes es un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales formado por tres ecuaciones, una para cada dirección del espacio. Se encuentran acopladas entre sí a través de la presión y la velocidad. (Cavada, 2015). De la ecuación (3)

$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$  = Término de advección

$\nabla p$  = Gradiente de presión

$\nu \nabla^2 \vec{v}$  = Término que representa la difusión

$\vec{f}_{ext}$  = fuerza externa

## 2.8 Ecuaciones básicas del Electromagnetismo

### 2.8.1 Ecuaciones de Maxwell en Forma diferencial

Las ecuaciones de Maxwell describen la evolución de un campo electromagnético en presencia o sin fuentes (Eymard, 2000). Desde una perspectiva clásica, la luz puede describirse como ondas de radiación electromagnética. Como tal, las ecuaciones de Maxwell son muy útiles para ilustrar una serie de características de la luz, incluida la polarización. (Duarte, 2015). Alrededor de 1860, el físico escocés James Clerk Maxwell dedujo que las leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo (leyes de Coulomb, Gauss, Biot-Savart, Ampere y Faraday)

podían resumirse de una forma matemática concisa que hoy es conocida como ecuaciones de Maxwell . (Perez,2004).Las cuales son las siguientes:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 J + \mu_0 * \epsilon_0 * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (7)$$

### 2.8.2 Ley De Gauss

Es una generalización de la Ley de Coulomb (1736-1806). La Ley de Coulomb es sólo válida para cargas estáticas, mientras que la Ley de Gauss vale también para campos que varían con el tiempo, es decir, cargas no estacionarias. Esta ley describe cómo convergen las líneas de campo sobre una carga negativa y cómo divergen desde una carga positiva (forma diferencial). Es decir, si la divergencia del campo eléctrico es positiva las líneas de campo forman más fuentes y si es negativo más sumideros. Es lo mismo interpretarla como que el flujo del vector desplazamiento a través de una superficie cerrada es numéricamente igual a la carga libre encerrada. (Perez,2004)

El flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada cualquiera es proporcional a la carga neta que se encuentre dentro de dicha superficie dividida por la permitividad eléctrica.

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q \text{ total en el interior de } S / \epsilon_0 \quad (8)$$

$\vec{E}$  es el campo eléctrico y  $\epsilon_0$  la permitividad eléctrica en el vacío.

En su forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (9)$$

$\rho$  =Densidad de carga electrica.

La ecuación (9) expresa que la divergencia de las líneas de campo eléctrico es proporcional a la densidad de carga eléctrica dividida por la permitividad eléctrica en el vacío. Cabe resaltar que la permitividad eléctrica expresa la atracción de dos cargas eléctricas unitarias en el vacío.

### 2.8.3 Ley de Gauss para campo Magnético

La divergencia del campo magnético es igual al cero lo que plantea hasta la actualidad la ausencia de monopolos magnéticos en la naturaleza. Es decir, el campo magnético  $\vec{B}$  siempre muestra un polo positivo y negativo.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots (10)$$

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (11)$$

En la ecuación (11) la expresión integral de la ecuación, muestra que el flujo magnético total en una superficie determinada es cero. Es decir, el total de líneas de campo magnético que ingresan es el mismo de las que salen del campo, las líneas de campo no se desconectan, experimentalmente se ha observado que siempre las líneas de campo magnético no divergen de ningún punto ni convergen a ningún punto, por lo tanto, su divergencia es nula (forma diferencial). O lo que es equivalente, que el flujo de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es nulo (forma integral). (Perez,2004)

### 2.8.4 Ley de Inducción electromagnética de Faraday

La rotacional de campo eléctrico es proporcional a la variación en el tiempo, es decir un campo magnético que varíe con el tiempo inducirá un campo eléctrico. (Perez,2004)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (12)$$

### 2.8.5 Ley de Ampere -Maxwell

Expresa la rotacional de campo magnético en un contorno cerrado es generado por la variaciones en el tiempo del campo eléctrico  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  y la influencia de la densidad de corriente

eléctrica  $J$  multiplicada por la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$  y  $\epsilon_0$  constante dieléctrica. Es decir que el campo magnético rota por acción de la densidad de corriente eléctrica (mide el flujo de cargas por unidad de tiempo) y la corriente de desplazamiento.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 J + \mu_0 * \epsilon_0 * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (13)$$

La ecuación original describe la relación entre el campo magnético y la corriente que la origina es decir, la electricidad. Sin embargo, Maxwell (1831-1879) introdujo un término adicional, que corresponde a la llamada corriente de desplazamiento. En la Ley de Ampere original había una falla cuando las corrientes eran variables, que Maxwell solucionó (Perez,2004). Cabe resaltar que la permeabilidad magnética, es la capacidad que tienen los materiales de afectar y ser afectados por los campos magnéticos.

## 2.9 El plasma

El plasma es considerado como el cuarto estado de la materia, el cual se produce a medida que aumenta el calor agregado a un sólido, eventualmente hará transiciones de fase al estado líquido, se volverá gaseosa y finalmente, los enlaces que unen electrones e iones se rompen convirtiéndose el gas en un plasma conductor de electricidad. Como definición simple se puede considerar al plasma como un fluido cuyo comportamiento está dominado por fuerzas eléctricas y magnéticas. Se tiene como ejemplos importantes de plasma: gas interestelar, estrellas, atmósferas estelares, y en la tierra, rayos, auroras, tubos fluorescentes, la ionosfera, plasmas de procesamiento de materiales y plasmas de fusión. (Howard,2002).

## 2.10 Magnetohidrodinámica

Se puede descubrir el significado de la palabra Magnetohidrodinámica, desglosándola en:

**Magneto:** campos electromagnéticos.

**Hidro:** fluidos.

**Dinámica:** fuerzas y las leyes de movimiento.

Usando lo anteriormente mencionado se puede decir que; la magnetohidrodinámica (MHD), es el modelo matemático que estudia la interacción entre fluidos conductores y campos eléctricos y electromagnéticos. El conjunto de ecuaciones que describen MHD son una combinación de las ecuaciones de Navier-Stokes de dinámica de fluidos y las ecuaciones de electromagnetismo de Maxwell. Estas ecuaciones diferenciales deben resolverse simultáneamente, ya sea analítica o numéricamente. (Schnac,2009). Se puede definir al fluido como una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a una tensión de cortadura por muy pequeña que esta sea (Streeter,1966).

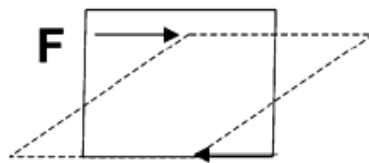


Figura 2.26. Representación de un elemento fluido. Fuente: (Schnac,2009).

En la figura 2.26 se muestra un esfuerzo cortante en el fluido, observándose que no genera fuerza de restauración por lo tanto la distorsión crecerá continuamente, esto es un indicador de que el fluido no puede soportar un cizallamiento (estrés). Veremos que la fuerza restauradora que se genera en respuesta a una fuerza aplicada, conduce a la propagación de ondas. Por lo tanto, se dice comúnmente que un fluido permite la propagación de ondas de compresión (p. ej., ondas de sonido), pero no ondas de corte.

Ahora considere la deformación cortada de un elemento fluido permeado por un campo magnético  $B$ , si el fluido es conductor de electricidad, veremos que el campo se deforma junto con el fluido. Si la fuerza de corte se aplica perpendicular a la dirección del campo magnético, la flexión resultante de las líneas de campo produce una fuerza restauradora que se opone al estrés aplicado. Por lo tanto, un fluido conductor de electricidad puede soportar la propagación de ondas de corte. Este resultado fue novedoso para la época ya que hubo observaciones astronómicas y experimentos posteriores que mostraron la existencia de estas ondas, y esto



llevó a la adjudicación en 1970 del Premio Nobel de física a Hannes Alfvén, cuyo nombre se atribuye a estas ondas. (Schnac,2009).

### **2.10.1 Línea de Campo Magnético**

En este punto, puede ser útil definir qué significa una línea de campo magnético. La inducción magnética, o campo magnético, es una función vectorial, denotada como  $B(x, t)$ , que asigna una magnitud y dirección a todos los puntos en el espacio. Físicamente, este campo se produce por corrientes eléctricas que fluyen en algún lugar del universo. Como con todos los campos vectoriales, es posible definir un conjunto de curvas tridimensionales que están en todas partes tangentes a el vector  $B$ . A veces se denominan líneas de corriente o líneas de campo. (Schnac,2009).

### **2.10.2 Suposiciones de la Magnetohidrodinámica**

Las suposiciones hechas al derivar el conjunto de ecuaciones básicas anteriores son las siguientes (Priest,2014):

- (1) El plasma tiene aproximadamente carga neutral.
- (2) El plasma se trata como un continuo, lo cual es válido siempre que la escala de longitud para variaciones sea grande excediendo las longitudes internas de plasma.
- (3) Se supone que el plasma está en equilibrio termodinámico.
- (4) Se supone que los coeficientes  $\eta$ (resistividad) y  $\mu$ (viscosidad) son uniformes, y se supone que la mayoría de las propiedades plasmáticas son isotrópicos.
- (5) Las ecuaciones están escritas para un marco inercial. Los términos adicionales que surgen para un marco que gira con el Sol son importantes para los procesos a gran escala.
- (6) Los efectos relativistas se descuidan, ya que se supone que la velocidad del flujo y la velocidad del sonido son mucho más pequeñas que la velocidad de la luz.

(7) El plasma se trata como un fluido único, aunque los modelos de dos o tres fluidos pueden ser más relevantes para las partes más frías o más raras de la atmósfera solar.

### **2.10.3 Enfoques de Magnetohidrodinámicas**

#### **2.10.3.1 Magnetohidrodinámica Ideal**

Considera el MHD de un fluido como perfectamente conductor, es decir, en ausencia de resistencia eléctrica, el campo eléctrico en un conductor perfecto es trivial: se desvanece, ya que la corriente eléctrica se volvería arbitrariamente grande si no fuera así. (Spruit,2013).

La MHD ideal tiene una aplicabilidad limitada cuando (Murphy,2014):

- Los efectos fluidos o cinéticos no son importantes (disipación en el viento solar turbulento, reconexión magnética y dinámica de la pequeña escala en la magnetosfera de la Tierra)
- MHD ideal no es muy buena describiendo la dinámica del laboratorio de plasmas, pero sigue siendo un buen predictor de estabilidad.

#### **2.10.3.2 Magnetohidrodinámica Resistiva**

Pose las suposiciones generales que están descritas en la sección (2.10.2), pero con la presencia de resistividad, la cual provoca que los campos magnéticos sufran variaciones extremas en su topología como en el caso de la reconexión magnética que va acompañado de liberación de energía extremas y altas temperaturas. Estos fenómenos ocurren en fulguraciones solares y en plasma de laboratorio. Por lo que esta área de la Magnetohidrodinámica, nos da una visión un poco más realista del movimiento del plasma, aplicado claro está, en plasma no relativistas, cuya velocidad del plasma sea menor a la velocidad de la luz. Este es el enfoque de estudio que vamos a usar en la presente tesis.

## 2.11 Ecuaciones de Magnetohidrodinámica

### 2.11.1 Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (14)$$

Representa, como la densidad de la plasma varia con respecto al tiempo, dentro de un volumen de control con respecto al movimiento del flujo de entrada y salida el cual se conserva.

Donde  $\rho$  es la densidad de masa,  $d/dt \equiv \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla$  (15) es la derivada material, total o convectiva de variaciones de tiempo, siguiendo el movimiento. La ecuación (15) expresa el hecho de que la densidad en un punto aumenta ( $\partial \rho / \partial t > 0$ ) si la masa fluye hacia la región circundante [ $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) < 0$ ] y disminuye si fluye hacia afuera. (Priest, 2014).

La ecuación se puede escribir como (Murphy, 2014):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \mathbf{v} \cdot (\nabla \rho) - \rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (16)$$

Donde  $\mathbf{v} \cdot (\nabla \rho) = \text{termino advectivo}$

$\rho \nabla \cdot \mathbf{v} = \text{Compresion}$

El termino advectivo es directamente derivado de la medida de cambio de la densidad en dirección de la velocidad. La derivada advectiva también se utiliza para describir la variación espacial de un campo en la dirección del flujo. El termino de compresibilidad expresa que:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} < 0 &\longleftrightarrow \text{Flujo convergente} \longleftrightarrow \text{compresión.} \\ \nabla \cdot \mathbf{v} > 0 &\longleftrightarrow \text{Flujo divergente} \longleftrightarrow \text{Dilatación.} \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 &\longleftrightarrow \text{El plasma es incompresible } (\rho \equiv \text{constante}). \end{aligned}$$

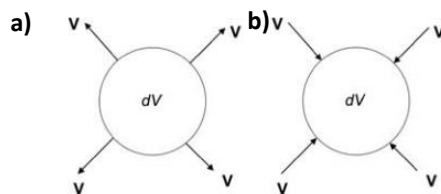


Figura 2.27. Movimiento de flujo.

a) El flujo se expande cuando  $\nabla \cdot \mathbf{v} > 0$ . b) El flujo se comprime cuando  $\nabla \cdot \mathbf{v} < 0$ .

Fuente: (Schnack, 2009).

En la figura 2.27 a,  $\nabla \cdot \mathbf{V} > 0$ , el flujo es divergente, hay flujo neto fuera del elemento de volumen y la masa dentro del elemento de volumen está disminuyendo. En la figura 2.27 b  $\nabla \cdot \mathbf{V} < 0$ , el flujo converge, hay flujo neto en el elemento de volumen y la masa dentro del elemento de volumen está aumentando. La ecuación de continuidad y la conservación de la masa son exactamente las mismas en hidrodinámica y MHD. ( Schnack, D,2009).

### 2.11.2 Ecuación de Movimiento

La ecuación de movimiento puede escribirse como:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = \underbrace{\rho \mathbf{g} + \rho_q \mathbf{E}}_{\text{F.Volumétricas}} + \underbrace{\mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla p + \nabla \cdot \Pi}_{\text{F.Superficiales}} \dots (17)$$

En términos generales esta ecuación, representa el cambio de la velocidad del plasma (movimiento  $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$ ) debido a las fuerzas que actúan sobre el fluido. Las cuales son volumétricas y superficiales:

**Las fuerzas volumétricas** actúan en todo el volumen del elemento fluido, como:

- *La Gravedad*: donde  $\mathbf{g}$  es la aceleración gravitacional.
- *Las fuerzas electromagnéticas*: dado que el fluido puede conducir electricidad, puede tener una densidad de corriente ( $\mathbf{J}$ )  $\mathbf{J} = \sum_{\alpha} n_{\alpha} q_{\alpha} \mathbf{V}_{\alpha}$  ( donde  $\sum_{\alpha}$  representa la suma de todas las especies de iones y electrones, y  $n_{\alpha}$ ,  $q_{\alpha}$  y  $\mathbf{V}_{\alpha}$  la densidad numérica, la carga eléctrica y la velocidad de especies  $\alpha$ , respectivamente) y en principio el fluido puede tener también, una carga eléctrica neta por unidad de volumen,  $\rho_q$ . Entonces, las fuerzas electromagnéticas (por unidad de volumen) sobre el fluido son: la fuerza eléctrica,  $\mathbf{F}_q = \rho_q \mathbf{E}$  (done  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico) y la fuerza de Lorentz,  $\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$  (donde  $\mathbf{B}$  es el campo magnético). ( Schnack,2009)

**Las fuerzas superficiales** son las fuerzas que actúan sobre una superficie  $S$ . Estas fuerzas pueden ser la fuerza de presión escalar y la tensión viscosa.

En condiciones de neutralidad eléctrica, en la ecuación de movimiento (17) se elimina el término  $\rho_q E$ , asimismo la viscosidad se considera despreciable debido a que el plasma es un gas ionizado e igualmente la gravedad se considera insignificante, si su efecto sobre el sistema es menor o despreciable en comparación a las otras fuerzas que actúan sobre la misma, por lo tanto, la ecuación (17) se convierte en:

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = J \times B - \nabla p \quad (18)$$

Por otro lado la fuerza de presión magnética empuja el plasma de regiones alta presión hacia regiones de baja presión magnética (Murphy, 2014) (figura 2.28a). Pero como se presenta en ecuación (18), existen más fuerzas, por lo que no necesariamente el plasma tendrá ese comportamiento, dependerá del problema estudiado. La fuerza de tensión magnética se dirige radialmente hacia adentro con respecto a las líneas curvadas del campo magnético; tratando de enderezar el campo magnético como se expresa en la (figura 2.28b). La gradiente de momento de flujo convectivo, expresa el comportamiento del flujo convectivo dentro del plasma.

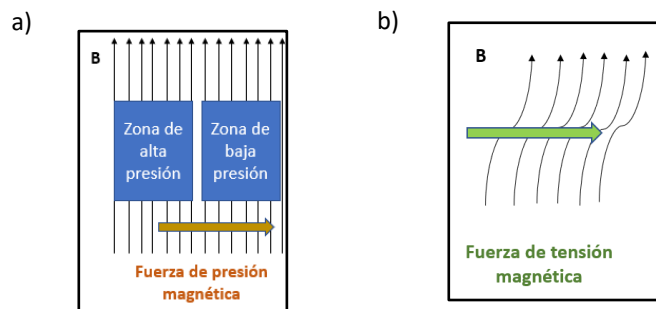


Figura 2.28. Movimiento de flujo.

a) Efectos de presión Magnética sobre el fluido b) Tensión Magnética en el plasma. (en líneas negras el campo magnético). Fuente: Elaboración propia.

#### 2.11.2.1 Fuerza de Lorentz

La fuerza de Lorentz es la fuerza magnética ejercida por el campo eléctrico sobre una carga eléctrica o una corriente eléctrica.

La fuerza magnética ( $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ ), se dirige a través del campo magnético, de modo que cualquier variación de movimiento o densidad a lo largo de las líneas de campo debe ser producida por otras fuerzas, como la gravedad o gradientes de presión. Otro punto es que la fuerza de Lorentz puede descomponerse en dos partes con importantes consecuencias físicas. Por lo tanto, después de sustituir  $\mathbf{j}$  de la ecuación  $\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B} / \mu$  se convierte en  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} / \mu$ , lo que reduce, mediante una identidad vectorial a (Priest,2014):

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \left( \frac{(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}}{\mu} - \nabla \left( \frac{B^2}{2\mu} \right) \right) \quad (19)$$

El primer término de la ecuación (19), en el lado derecho es la fuerza de tensión magnética, que no es cero si  $B$  varía a lo largo la dirección de  $B$  y puede considerarse producida por el efecto de una tensión a lo largo de  $B$  de magnitud  $\frac{B^2}{2\mu}$  por unidad de área (Priest,2014). El segundo término de la ecuación (19) representa una fuerza de presión magnética, lo mismo en todas las direcciones. La fuerza de presión normal a  $B$  se cancela con la fuerza de tensión correspondiente, como debe ser, ya que la fuerza  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  es normal a  $B$ . La fuerza de Lorentz por lo tanto tiene dos efectos. Actúa tanto para acortar las líneas de campo magnético a través de la fuerza de tensión y también para comprimir plasma a través de la fuerza de presión magnética. La tensión produce una fuerza resultante (normal a  $B$ ) cuando el campo está curvado, mientras que la presión magnética produce un efecto resultante cuando la magnitud de  $B$  está cambiando en una dirección normal a  $B$  (Priest,2014).

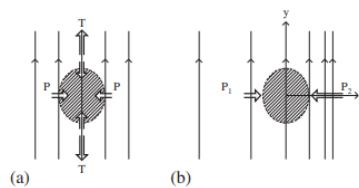


Figura 2.29. Comportamiento de los campos magnéticos en el plasma.

- (a) En un campo uniforme, las presiones magnéticas (P) y las tensiones (T) se equilibran.  
(b) En un campo  $B(x)$  y con  $dB/dx > 0$ , hay un desequilibrio ( $P_2 > P_1$ ). Fuente: (Priest,2014).

### 2.11.3 Ecuación de Energía

Esta ecuación representa el cambio de energía en el tiempo con respecto a el calor y el trabajo producido por el plasma. La entropía de cualquier plasma es constante.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (E)}_{\text{Densidad total de Energía}} + \underbrace{\nabla \cdot \left[ \left( E + p + \frac{1}{2} B^2 \right) \mathbf{v} - \mathbf{v} \cdot B \mathbf{B} \right]}_{\text{Flujo de Energía}} = m\mathbf{g} - \nabla \cdot [(\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{J}) \times \mathbf{B}] + \nabla \cdot (\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla \mathbf{T}) + \Psi_E \quad (20)$$

En el lado izquierdo de la ecuación (20) se tiene que:

- **La densidad total de energía:**  $E = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho e + \frac{1}{2} B^2$ , donde:  $\frac{1}{2} \rho v^2 =$  Energía cinética y  $\rho e + \frac{1}{2} B^2 =$  Densidad potencial de energía = Densidad de energía interna ( $\rho e$ ) + Densidad de energía del campo magnético ( $\frac{1}{2} B^2$ ).
- **El flujo de energía** se descompone en:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \text{Flujo de energía cinética}$$

$$\rho e = \text{Flujo de energía interna}$$

$$p = \text{Trabajo hecho por el gradiente del plasma}$$

$$\mathbf{v} \cdot B \mathbf{B} = \text{Flujo electromagnético}$$

Del lado derecho de la ecuación (20), operan cuatro términos importantes que afectan el cambio neto de la energía en el sistema, donde;  $m\mathbf{g}$  es la fuerza por acción de la gravedad,  $\nabla \cdot [(\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{J}) \times \mathbf{B}]$  es la tasa de calentamiento volumétrico debido a procesos resistivos (acción de la resistividad),  $\nabla \cdot (\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla \mathbf{T})$  es el término que expresa la conducción térmica (donde  $\boldsymbol{\kappa}$  es el tensor de conductividad térmica anisotrópico y  $\nabla \mathbf{T}$  es el gradiente de temperatura) y  $\Psi_E$  es el término fuente debido a los efectos turbulentos, este término fuente permite corregir la ecuación de energía considerando la escala de viscosidad a la cual la turbulencia se disipa.

El término que involucra  $m\mathbf{g}$  se elimina cuando el efecto sobre el sistema es mínimo o nulo, por otro lado, la conducción térmica se elimina, si se trabaja con un estado ideal donde el calor

no se propaga a través del plasma y los campos magnéticos, siguiendo estas restricciones la ecuación (20) se convierte en;

$$\frac{\partial}{\partial t} (E) + \nabla \left[ \left( E + p + \frac{1}{2} B^2 \right) v - v \cdot BB \right] = mg - \nabla \cdot [(\eta \cdot J) \times B] + \Psi_E$$

El termino fuente debido a los efectos turbulentos se suprime cuando el fenómeno a estudiar no presenta turbulencia en los datos reales, o la misma solo está presente a pequeñas escalas que no son observables para la simulación. Por otro lado, se agrega la turbulencia cuando se conoce, por las teorías MHD del proceso físico a estudiar, que la turbulencia es importante para su generación. La turbulencia MHD es estudiada en diversas áreas de investigación, como: ingeniería nuclear, fusión nuclear, tecnología de metales líquidos, entre otros. Además, para la implementación de la turbulencia existen diferentes modelos como: isotrópicos, anisotrópicos, etc.; cuyas condiciones iniciales dependen del problema y el área a estudiar.

$$\frac{\partial}{\partial t} (E) + \nabla \left[ \left( E + p + \frac{1}{2} B^2 \right) v - v \cdot BB \right] = - \nabla \cdot [(\eta \cdot J) \times B] \quad (20.1)$$

La ecuación anterior en su forma resistiva se puede expresar como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \nabla \cdot v - \frac{2(\gamma - 1)\eta}{\rho \beta_o} j \cdot j = 0.0$$

Donde T= temperatura V= velocidad , ,  $\eta$  =resistividad ,  $P$  = *presion* ,  $B$  =campo Magentico ,  $j$  = densidad de corriente ,  $\gamma$  =constante adiabatica ,  $\beta_o$  =beta del plasma .

#### 2.11.4 Ecuación de Inducción

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B \quad (21)$$

Esta ecuación muestra la variación del campo magnético en el tiempo con respecto a la velocidad del plasma y la gradiente del campo magnético afectado por la resistividad dentro de la difusividad magnética.



Esta ecuación se deriva de:

$$\nabla \times B = \mu J + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (22) \text{ ley de Ampere}$$

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (23) \text{ Fuerza de Lorentz}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (24) \text{ Ecuación de Faraday-Maxwell}$$

Eliminando de  $\frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$  (22) tenemos  $j = \nabla \times B / \mu$  (25), reemplazando (25) en (23):

$$\nabla \times \frac{B}{\mu\sigma} = (E + v \times B) \quad (26)$$

De (26) despejamos E,  $E = \nabla \times \frac{B}{\mu\sigma} - v \times B \quad (27)$

Reemplazando (27) en (24) se obtiene:  $-\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (\nabla \times \frac{B}{\mu\sigma}) - \nabla \times (v \times B) \quad (28)$

Ordenando valores se obtiene de (28)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta_{dif} \nabla^2 B \quad (29)$$

Ahora que tenemos esta ecuación es importante acotar que el primer término del lado derecho expresa los efectos convectivos sobre los campos magnéticos y la segunda los efectos difusivos.

Siendo  $\eta_{dif}$  el término de difusión magnético en ( $m^2 s^{-1}$ ) que es igual a  $\eta_{dif} = \frac{1}{\sigma * \mu}$  donde

$\sigma = \text{conductividad eléctrica} \left( \frac{1}{\Omega * m} \right)$  y  $\mu$  es la permeabilidad eléctrica del vacío  $\mu = 4 * \pi *$

$1 * 10^{-7} \frac{ohm}{m}$ . Un parámetro fundamental en el movimiento del plasma y la difusividad es la

resistividad eléctrica  $\eta = \frac{1}{\sigma}$  ( $\Omega \cdot m$ ), por lo que la difusividad magnética puede expresarse como

$$\eta_{dif} = \frac{\eta}{\mu}.$$

Ya que la difusividad magnética depende completamente de la resistividad eléctrica, puesto que  $\mu$  es constante, los valores que tome la resistividad afectaran el movimiento de los campos magnéticos. Puesto que este parámetro funciona como resistencia eléctrica al movimiento de la corriente eléctrica dentro de los campos magnéticos. Por otro lado, de la ecuación (29) se puede deducir el número de Reynolds como la relación entre el termino convectivo y difusivo.

#### 2.11.4.1 Numero de Reynolds

$$R_m = \frac{L_0 V_0}{\eta} \quad (30)$$

$V_0$ =es una escala de velocidad típica del fluido. (m/s)

$L_0$ =es la escala de longitud típica del fluido.(m)

$\eta$  =es la viscosidad magnética.(  $m^2/s$ )

El número de Reynolds magnético se puede considerar como una relación típica de los términos **convectivo y difusivo en la ecuación de inducción (4)**. En los sistemas astrofísicos,  $R_m$  suele ser muy grande, pero principalmente porque las escalas son grandes, no porque la difusividad magnética sea pequeña. Solo en el caso de los superconductores, la difusividad magnética es idénticamente cero. Además, incluso si la difusividad magnética es muy baja, la turbulencia de MHD a menudo produce estructuras a muy pequeña escala y grandes gradientes magnéticos, aunque el número de Reynolds magnético puede ser enorme. En el sol es enorme y de orden  $10^6$ . Los efectos disipativos son generalmente pequeños y no hay dificultad en mantener un campo magnético contra la difusión. (Priest &Forbes,2000)

Cuando  $R_m > 1$ , la ecuación se convierte en:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B)$$

Lo que representa que cuando es grande, el campo magnético se congela en el plasma (el campo magnético en un fluido perfectamente conductor cambia con el tiempo, bajo la influencia de un

campo de velocidad), por lo que el campo magnético se mueve con el plasma (Priest,2014). Es decir, la velocidad del plasma maneja el movimiento del campo magnético y este no puede romperse o cambiar su topología considerablemente. Esto ocurre a grandes escalas espaciales como, por ejemplo, en la corona solar sobre una región activa, donde  $T = 10^6 K$  encontramos  $R_m \approx 10^9$  . (Priest &Forbes,2000)

En el segundo caso cuando si  $R_m < 1$  la ecuación 29 se convierte:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta_{dif} \nabla^2 B$$

El campo magnético se difunde a través del plasma (la difusividad domina el campo magnético). Esto ocurre en pequeñas escalas como en la hoja de corriente en la reconexión magnética, ya que la resistividad se activa produciendo cambios en la topología. La expresión anterior significa que, el efecto de la resistividad sobre el sistema es más notorio, generando el aumento de la difusión que permite que los campos magnéticos cercanos, puedan fusionarse o cambiar su forma (topología) inicial, como ocurre en el caso de la reconexión magnética.

### 2.11.5 Representacion del campo Magnetico

Hay varias formas de escribir el campo magnético para que satisfaga automáticamente la ecuación:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (31)$$

Lo primero es poner

$$B = \nabla \times A \quad (32)$$

En el caso particular de un campo bidimensional ( $B_x, B_y$ ), digamos, el potencial vectorial puede escribirse  $A = A\hat{z}$ , donde  $A(x, y)$  es la función de flujo magnético:

$$B_x, B_y = \left( \frac{\partial A}{\partial y}, -\frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (33)$$

Cuando la densidad de corriente se desvanece en todas partes, la ecuación.  $j = \nabla \times B / \mu$  implica que  $\nabla \times B = 0$ , junto con la ecuación  $\nabla \cdot B = 0$  produce la ecuación vectorial de Laplace  $\nabla^2 B = 0$ . Por lo tanto, el campo magnético es potencial y se puede aplicar la teoría potencial. (Priest,2014)

Es a menudo conveniente para escribir cuando el campo está libre de corriente:

$$B = \nabla \Psi \quad (34)$$

Aunque también se escribe como  $B = \nabla \times \Psi$  donde  $\Psi$  es el potencial magnético escalar que satisface la ecuación escalar de Laplace  $\nabla^2 \Psi = 0$ . La belleza de esto es que, una vez que se encuentra  $\Psi$ , los componentes del campo se derivan inmediatamente de la ecuación (34) y  $\nabla \times B = 0$  y  $\nabla \cdot B = 0$  se satisfacen automáticamente. Muchos códigos computacionales sirven para construir un modelo de potencial de campo para la corona utilizando el campo magnético fotosférico de línea de visión medida como condición de limite. La utilidad de tal modelo para la corona no debe subestimarse. A menudo es una muy buena aproximación que puede usarse para estimar las formas de los bucles coronales, la fuerza del campo magnético coronal o la topología global del campo. Además, con el poder de la computadora moderna se puede obtener muy fácilmente. Por lo tanto, un campo potencial es a menudo una primera aproximación útil, ya que encontrar el campo realista, no potencial puede ser extremadamente difícil y lento. (Priest,2014)

#### 2.11.6 Beta del plasma

Otro número adimensional importante en la teoría MHD es el beta del plasma( $\beta$ ), definido como la relación de la presión del gas  $P$  en Pa , a la presión magnética  $P_{mag} = B^2 / 2\mu_0$  , donde  $P_{mag}$  en Pa ,  $B$  en T(tesla) y  $\mu_0$  en  $\left(\frac{\text{H(henry)}}{\text{m}}\right)$  en S.I unidades.

$$\beta = 2pB^2 / 2\mu_0 \quad (35)$$

Cuando el campo magnético domina en el fluido,  $\beta \ll 1$ , el fluido se ve obligado a moverse junto con el campo magnético. En el caso opuesto, cuando el campo magnético es débil,  $\beta \gg 1$ , el campo magnético gira a lo largo del fluido.

### 2.11.7 Resistividad del Plasma

Es un término que describe la medida de la fuerza que se opone a la corriente eléctrica expresado en  $\eta$  ( $\Omega \cdot \text{metro}$ ), es considerado en inverso de la conductividad eléctrica donde:

$$\eta = \frac{1}{\sigma} \text{ siendo } \sigma = \text{conductividad eléctrica } \left( \frac{1}{\Omega \cdot m} \right).$$

### 2.12 Enfoques de estudio del inicio de la etapa de liberación de energía

Los enfoques principales de estudio para el inicio de la etapa de liberación de energía postulan diferentes hipótesis acerca de los procesos que pueden generar la explosión de una cuerda de flujo (campo magnético de una estructura solar) y la reconexión magnética en la fulguración solar.

(Linker *et al.*, 2003) Plantean en su investigación que al reducir la fuerza de tensión magnética del campo suprayacente que confina la cuerda de flujo, genera que la presión magnética ascendente domine en algún punto de la evolución y ocurre una erupción.

(Forbes e Isenberg, 1991 ; Amari *et al.*, 1999 ; Roussev *et al.*, 2003 ; Lin, 2004 ; Isenberg y Forbes, 2007), sugieren que hay una altura crítica de una cuerda de flujo, más allá de la cual no existe un estado de equilibrio vecino, por lo que si una cuerda de flujo alcanza esta altura, entonces ocurre inevitablemente una transición dinámica que causa la explosión.

(Antiochos *et al.*, 1999), sugiere que primero se forma una hoja de corriente en la interfaz entre los dominios de flujo interno y suprayacente. La reconexión magnética ocurre entonces en esta hoja de corriente, reduciendo la fuerza de tensión de confinamiento del campo suprayacente. El dominio interior comienza a expandirse, dentro del cual se forma otra hoja de corriente y la

segunda reconexión, se produce para producir una fulguración solar. Como resultado de la segunda reconexión, se forma una cuerda de flujo, que finalmente irrumpe en el espacio interplanetario. (Chen y Shibata, 2000) plantean que el campo magnético emergente interactúa con el campo preexistente que contiene una cuerda de flujo. Esa interacción conduce a la formación de una hoja de corriente en la interfaz entre esos dos campos. La reconexión magnética ocurre luego en esta hoja de corriente, desestabilizando la cuerda de flujo, que estalla a través de la segunda reconexión que es similar a la explicada en el modelo de ruptura.

### 2.13 Método de volúmenes Finitos

El método de los volúmenes finitos permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Que considera una malla de discretización del espacio fluido. En torno a cada punto de esta malla se construye un volumen de control que no se traslapa con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere especificar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, de modo de poder evaluar las integrales resultantes. La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizadas resultante, es que la solución obtenida satisface en forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla o forma de la misma. (Niño, 2012).

En el método de volúmenes finitos (FVM, Finite Volume Method), se discretiza el dominio  $\Omega$  un problema en un número finito  $N$  de celdas  $\Omega_j = [x_{j-\frac{1}{2}}, x_{j+\frac{1}{2}}]$ , ( $j = 1, 2, \dots, N$ ). Dentro de cada celda  $\Omega_j$  se propone una interpolación a las variables del vector de estado por funciones constantes a trozos. Es decir, se asume que las variables conservativas toman un valor constante dentro de cada celda, que se va actualizando conforme se avanza en el tiempo. De esta manera

la forma integral de una ley de un sistema no conservativo, puede escribirse para cada celda  $\Omega_j$  en la forma discreta como (Cimino,2015):

$$\frac{U_j}{\Delta t} = \frac{-1}{\Delta x} [\bar{F}_{j+\frac{1}{2}} - \bar{F}_{j-\frac{1}{2}}] + S(U)_j \quad (36)$$

Donde  $\Delta x = x_{j+1} - x_j > 0$ ,  $U$  es el vector de variables de estado, y  $\bar{F}_{j+\frac{1}{2}}$  es una función de flujo numérico, evaluada en la interfaz de dos celdas contiguas, que debe aproximar de forma discreta la función de flujo del sistema hiperbólico continuo. (Cimino,2015).

### 2.13.1 Formulación de volúmenes finitos (Mignone,2021)

Para un sistema de leyes de conservación como el MHD se tiene:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F = S \quad (37)$$

$U$ : Vector de cantidades conservada,  $S$ =Termino fuente,  $F=F_{hyp} + F_{par}$  Donde  $F_{hyp}$  flujo hiperbólico (propagación onda)  $F_{par}$  flujo parabolico (o difusivo).

Entonces para la formulación de volúmenes finitos en la forma conservativa, partimos de la forma diferencial de la ecuación:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (38)$$

Integrando la ecuación (38) en un intervalo de tiempo:  $\Delta t = t^{n+1} - t^n$  y un tamaño de celda  $\Delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$  se obtiene:

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} \right) dt dx = 0 \quad (39)$$

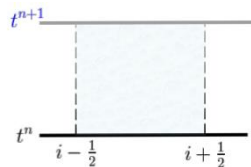


Figura 2.30. Tiempo y espacio en la malla. Fuente: (Mignone,2021)

De la integración de la ecuación (39) se obtiene:

$$\langle U \rangle_i^{n+1} = \langle U \rangle_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \tilde{F}_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \tilde{F}_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) = 0 \quad (40)$$

Donde:

$$\langle U \rangle_i = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} U(x, t) dx \quad \tilde{F}_{i\pm\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^{n+1}} F \left( U(x_{i\pm\frac{1}{2}}), t \right) dt$$

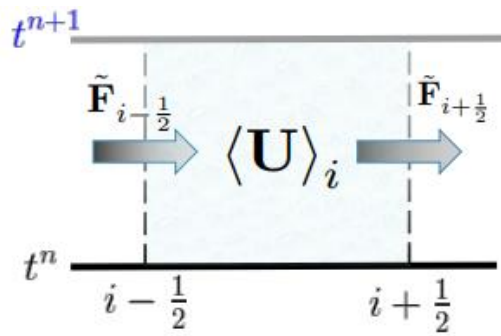


Figura 2.31. Intervalos de tiempo y espacio. Fuente: (Mignone,2021)

La ecuación es la forma conservativa o integral de la ecuación (40), esta es una relación exacta que garantiza propiedades de conservación global (como la conservación de masa), al mismo tiempo, da una representación integral de la ecuación diferencial parcial original, asegurando una correcta descripción de discontinuidades (choques) en términos de velocidad y saltos, la forma integral no utiliza derivadas parciales. (Mignone,2021)

Como se observa en la ecuación (40) el flujo es un componente importante, a continuación, se mencionará el cálculo de la misma:

### 2.13.1.1 Cálculo del Flujo

El cálculo de flujo en las interfaces de celda ( $i + 1/2$ ) es el corazón de un código de volumen finito, la aproximación introducida para el cálculo del flujo es (Mignone,2021):

$$\tilde{F}_{i\pm\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^{n+1}} F \left( U(x_{i\pm\frac{1}{2}}), t \right) dt \quad (41)$$

Donde  $U(x, t)$ , para  $t > t^n$ , no se conoce, además el flujo total ( $F$ ):  $F = F_{hyp} + F_{par}$ .



Donde  $F_{hyp}$  flujo hiperbólico (propagación de onda)  $F_{par}$  flujo parabólico (difusivo).

### 2.13.1.2 Cálculo de flujo hiperbólico

Los flujos hiperbólicos se calculan utilizando un formalismo que se remonta a la obra de (Godunov ,1961), la solución siempre se considera discontinua en las interfaces de la celda (Mignone,2021).

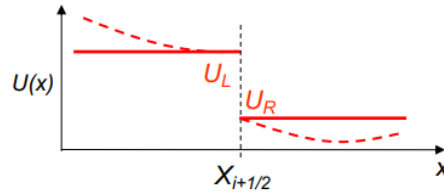


Figura 2.32. Vector de cantidades conservados y celdas. Fuente: (Mignone,2021)

Esto requiere resolver el llamado "Problema de Riemann", es decir, la evolución de una discontinuidad inicial que separa dos estados constantes. El problema de Riemann es definido por la siguiente condición inicial (Mignone,2021):

$$\begin{cases} U_L & \text{por } x < x_{i+\frac{1}{2}} \\ U_R & \text{por } x > x_{i+\frac{1}{2}} \end{cases} \Rightarrow U \left( x_{i+\frac{1}{2}}, t > 0 \right) \quad (42)$$

### 2.13.1.3 Cálculo del Flujo Parabólico (difusivo)

Los términos parabólicos (de difusión) describen la transferencia de momento o energía debido a procesos microscópicos sin requerir movimiento masivo. Ejemplos: resistividad magnética y conducción. Para la solución numérica de Ecuación diferencial parcial parabólica podemos empezar por considerar la ecuación de difusión simple (Mignone,2021):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (43)$$

Tradicionalmente para la solución numérica de este tipo de ecuación, se han utilizado ampliamente dos clases de métodos: explícitos o implícitos

### a) Esquemas explícito

$$U_i^{n+1} = U_i^n + C( U_{i-1}^n - 2U_i^n + U_{i+1}^n ) \quad (44)$$

Los esquemas explícitos son aquellos en los que el cálculo de las variables en un instante se efectúa tan sólo con los valores que toman en el instante anterior. Cada punto del dominio espacial (o cada volumen finito) se calcula pues independientemente de los demás. Los esquemas explícitos tienen un coste computacional pequeño en cada paso de tiempo, pero para ser estables es necesario trabajar con incrementos de tiempo también pequeños (Bladé,2005). Además, estos esquemas tienen: fácil implementación, buen rendimiento para computación paralela distribuida; sin embargo, la estabilidad exige  $\Delta T \leq \frac{x^2}{2D}$ . (Muy restrictivo). (Mignone,2021)

### b) Esquema implícito

$$U_i^{n+1} = U_i^n + C( U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^{n+1} ) \quad (45)$$

Un esquema implícito evalúa las variables dependientes en el instante  $t^{n+1}$  a partir de los valores en puntos adyacentes al cálculo en el instante anterior  $t^n$ , pero también en el mismo instante  $t^{n+1}$ . La resolución de un punto del espacio en un instante, implica pues los valores en otros puntos del espacio en el mismo instante, por lo que se debe resolver en cada paso de tiempo un sistema de ecuaciones que engloba todas las variables en todos los puntos del espacio en el instante  $t^{n+1}$  (Bladé, 2005). Estos tipos de esquemas, no tienen límite de estabilidad (incondicionalmente estable), sin embargo, son difíciles de implementar, ya que requieren una operación global que no puede ser llevado a cabo de manera eficiente en dominios paralelos. (Mignone,2021)

## 2.14 Software PLUTO

PLUTO es un software de distribución gratuita para la solución numérica de sistemas mixtos hiperbólicos/parabólicos de ecuaciones diferenciales parciales (leyes de conservación). El código tiene una estructura sencilla, utiliza el enfoque de volumen finito o diferencias finitas. Las ecuaciones se discretizan y resuelven en una malla estructurada que puede ser estática o adaptativa. El código está escrito en el lenguaje de programación C, mientras que la interfaz requiere también C ++ y Fortran. Es altamente portátil y puede ejecutarse desde una sola computadora hasta varios miles de procesadores que utilizan la interfaz de paso de mensajes (MPI) para lograr un rendimiento paralelo altamente escalable.( PLUTO Team,2020).El software se desarrolla en el Departamento de Física de la Universidad de Turín,Italia , en colaboración con INAF(Instituto Nacional de Astrofísica), El observatorio Astronómico de Torinto y el Departamento de CINECA del SCAI( Supercomputing Applications and Innovation).

### 2.14.1 Esquema de trabajo en pluto

PLUTO está diseñado para integrar un sistema general de leyes de conservación que escribimos como. (Mignone, 2007):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla \cdot F(U) + S(U) \quad (46)$$

U:Vector de cantidades conservadas

S(U): Término fuente

T(U): Es el tensor de rango 2 que contiene los flujos de cada componente

1. Los promedios de volumen U se convierten en variables primitivas  $V(\rho, B, v \text{ y } P)$ .
2. Los estados izquierdo y derecho  $V_{+,L}, V_{-,R}$  se construyen dentro de cada zona por interpolación y / o extrapolación.

3. Se resuelve un problema de Riemann entre  $V_{+,L}, V_{-,R}$  para calcular la función de flujo numérico  $F_+$  en las interfaces de celda.
4. La solución finalmente avanza en el tiempo.

En el capítulo 4 se elijará los métodos de solución para el esquema presentado. A continuación, se explicará con más detalle cómo funciona el algoritmo de esquema de trabajo en PLUTO:

#### ***2.14.1.1 El algoritmo reconstruir-resolver-actualizar***

En términos generales, este algoritmo se compone de tres pasos: una interpolación, seguida de la solución de los problemas de Riemann en las zonas límites y una etapa de evolución final. En PLUTO, esta secuencia de pasos proporciona la infraestructura necesaria del código, en el nivel superior, el sistema original de ecuaciones se integra siguiendo esta secuencia general de pasos, independientemente de cualquier conocimiento de la física involucrada. La forma explícita de  $U$ ,  $V$ ,  $T(U)$  y  $S(U)$ , por otro lado, depende del módulo físico seleccionado. Así, en el nivel inferior, un módulo físico recopila el conjunto de algoritmos necesarios para calcular los términos involucrados en la discretización del lado derecho de la ecuación (46), este conjunto debe proporcionar uno o más solucionadores de Riemann, para la conversión entre variables primitivas y conservadas, una rutina de flujo que da los componentes de  $T(U)$  en cada dirección y una función de término fuente (si existe) (Mignone et al,2007).

#### **Proceso de solución del algoritmo** (Mignone,2021)

1. El proceso empieza a partir de volúmenes promedio (volume-averages):

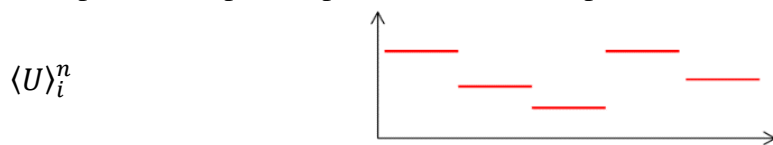


Figura 2.33. Volúmenes promedio. Fuente: (Mignone,2021)

2. Se reconstruye los valores de la interfaz de zona entre promedios, utilizando un polinomio no oscilatorio de orden superior:

$$\begin{cases} U_{i+\frac{1}{2}}^L = \lim_{x \rightarrow x_{i+\frac{1}{2}}^-} U_i(x), \\ U_{i+\frac{1}{2}}^R = \lim_{x \rightarrow x_{i+\frac{1}{2}}^+} U_{i+1}(x), \end{cases} \quad (47)$$

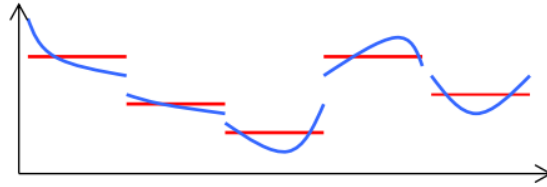


Figura 2.34. Reconstrucción. Fuente: (Mignone,2021)

3. Resuelva los problemas de Riemann entre estados adyacentes, discontinuos al calcular el flujo de la interfaz.

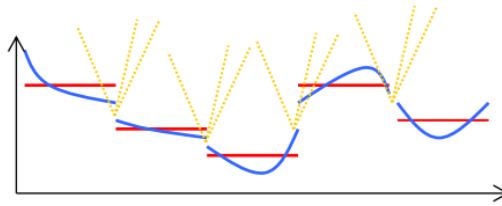


Figura 2.35. Resolviendo el problema de Riemann. Fuente: (Mignone,2021)

4. Se actualiza las variables conservadas con un algoritmo de paso de tiempo (por ejemplo, Runge Kutta de orden 2).

### 3 Capítulo III: Selección y descripción del objetivo de estudio.

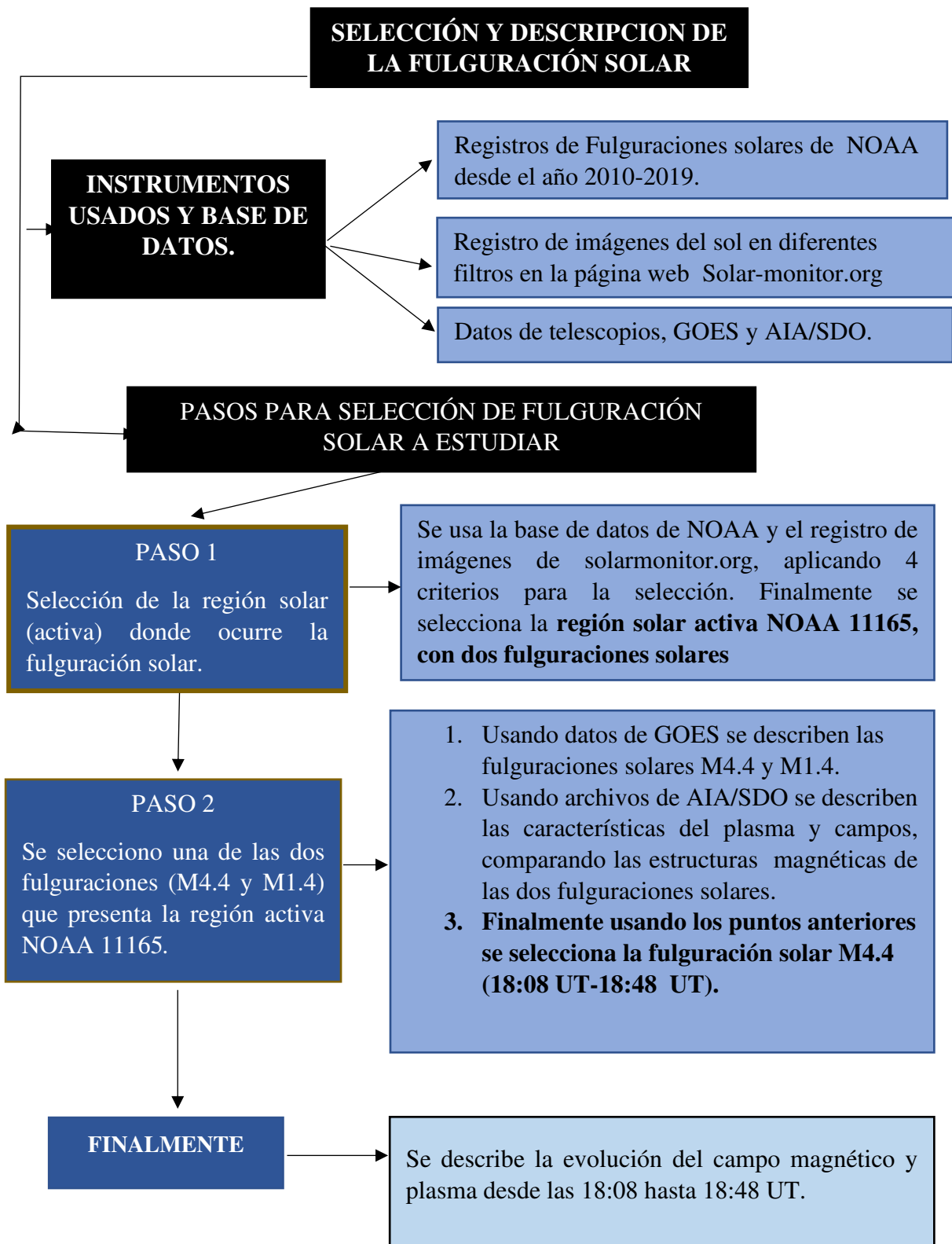


Figura 3.1. Selección y descripción de la fulguración solar seleccionada. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, vamos a desarrollar cada punto mostrado en el esquema anterior.

### **3.1 Instrumentos Utilizados**

#### **3.1.1 Telescopios espaciales de rayos-X: GOES**

Las naves espaciales GOES 12 a 15, llevan cada una un sofisticado telescopio de rayos X llamado “The Solar X-ray Imager (SXI)” para monitorear la atmósfera exterior o corona caliente del Sol. El flujo de fotones de rayos X, se crea en el plasma de millones de grados de la corona solar y no son visibles desde el suelo, debido a la absorción de la atmósfera de la Tierra. Las observaciones de rayos X solares ayudan en la detección temprana de erupciones solares, eyecciones de masa coronal (CME) y otros fenómenos que afectan el entorno geoespacial. (Jenner,2017).



Figura 3.2. Representación del GOES-R. (Jenner,2017)

#### **3.1.2 AIA (The Atmospheric Imaging Assembly) en Solar Dynamics Observatory (SDO)**

La misión de la NASA, Solar Dynamics Observatory (SDO) -2011, es un telescopio espacial observando el Sol con tres instrumentos y se encuentra en una órbita geoestacionaria alrededor de la Tierra. Los instrumentos AIA (The Atmospheric Imaging Assembly) y HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) nos proporcionan imágenes solares con detalles sin precedentes. Estos instrumentos registran numerosas imágenes del Sol en diferentes longitudes de onda, revelando muchos fenómenos solares diferentes como: las fulguraciones solares, agujeros coronales, las manchas solares y las prominencias. (Lemen,2011).El Ensamble de Imágenes Atmosféricas (The Atmospheric Imaging Assembly,AIA) proporciona múltiples imágenes simultáneas de alta resolución de disco completo de la corona y la región de transición hasta 0.5 ( $6.957 \times 10^8 \text{m}$ )

por encima del limbo solar. AIA consta de cuatro telescopios que emplean ópticas recubiertas de capas múltiples, de incidencia normal para proporcionar imágenes de banda estrecha de siete pasos de banda ultravioleta extrema (EUV) centrados en líneas específicas: Fe XVIII (94Å), Fe VIII, Fe XXI (131Å), Fe IX (171Å), Fe XII, XXIV (193Å), Fe XIV (211Å), He II (304Å) y Fe XVI (335Å). (Lemen,2011)

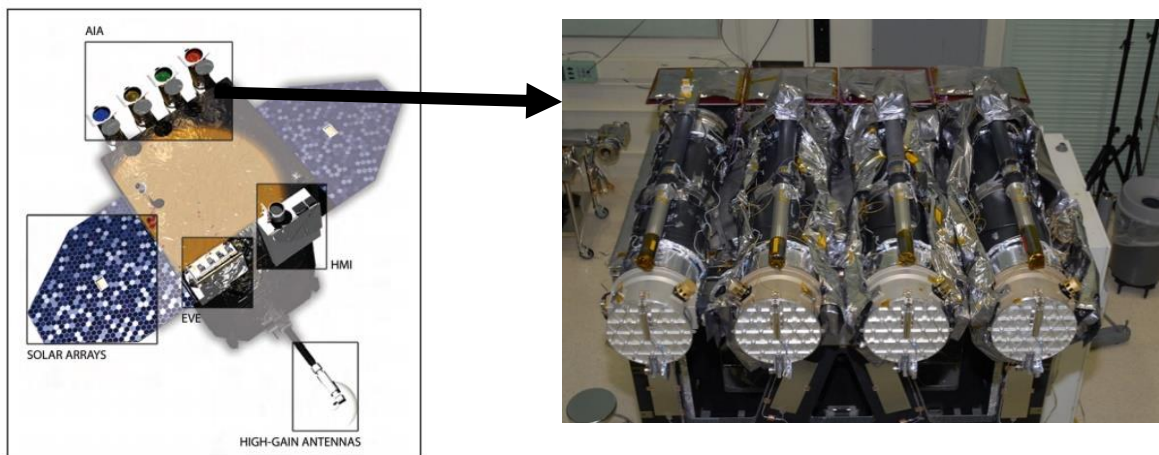


Figura 3.3.) Nave espacial del SDO (NASA,2015). b) Instrumento The Atmospheric Imaging Assembly (Addinson y Pesnell,2015)

## 3.2 Base de Datos

En esta parte se usará los datos de GOES de la página web (GOES,2017), del catálogo de fulguraciones solares de NOAA, de los años 2010 a 2019. Cada año se guarda en un archivo de extensión.txt, cuya estructura es la siguiente:

```
GOES XRAY events for 2010
Written 22-Aug-2013, Kim Tolbert, kim.tolbert@nasa.gov, by goes_make_yearly_eventlist.pro
Original NOAA event lists: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/

Columns: Date, Start, Peak, End Time, Class, Position (if available), Active Region (if available)

1-Jan-2010 12:02 12:09 12:18 B1.9
1-Jan-2010 12:33 12:43 13:00 B2.3
1-Jan-2010 23:29 23:33 23:42 B1.1
2-Jan-2010 03:10 03:13 03:19 B1.1 11039
2-Jan-2010 07:09 07:24 07:40 C1.0 S29W37 11039
2-Jan-2010 07:58 08:05 08:13 B6.4 S29W37 11039
2-Jan-2010 09:01 09:10 09:23 B4.5 S29W39 11039
```

Figura 3.4.Ejemplo de estructura de datos del año 2010. Fuente: GOES-data web

Como se observa en la figura.3.4 cada archivo contiene, la hora de inicio del evento, el pico y el tiempo final, junto con la clase, la posición y la región activa. Cada lista de NOAA, guardan en cada archivo de formato “goes\_xray\_event\_list\_año”, con mediciones de cada año de



fulguraciones solares (FS); como se conoce, estas FS ocurren constantemente en el sol, por lo que el total de registros por año pueden alcanzar números muy elevados.

Por otro lado debido a que, se necesita filtrar los datos de NOAA, usando los criterios mencionados en la siguiente sección, se generó un algoritmo escrito en Python 3 (con programación orientada a objetos) usando los paquetes numpy, sunpy, math, matplotlib y scipy, que facilitó la selección y aplicación de los siguientes criterios:

### 3.3 Selección de la Fulguración Solar a estudiar

Para poder realizar la selección de la fulguración solar se dividió el proceso en 2 pasos:

1. Encontrar la región solar (Activa) donde ocurre las fulguraciones solares.
2. Describir las fulguraciones de la región solar seleccionada y elegir una de ellas como objetivo de estudio.

#### Paso 1: Selección de Región solar de estudio

##### Criterio 1: Por Intensidad de evento en las regiones solares

Los eventos que ocurran en la región solar de estudio, deben ser de clase X o M, puesto que estos son los más energéticos, cuyas partículas pueden afectar directamente la magnetosfera y traspasar el mismo. Aplicando ese criterio al total de registros de los años (2010-2019) y haciendo uso del algoritmo de selección construido en Python, se encontró 798 eventos:

Tabla 3.1. Número de eventos por año

Año seleccionado	Eventos X	Eventos M
2010	0	23
2011	8	111
2012	7	129
2013	12	99
2014	16	207
2015	2	125
2016	0	16
2017	4	39
2018	0	0
2019	0	0

*Fuente: Elaboración propia.*

Analizando la tabla 3.1, se puede identificar que: Las fulguraciones solares tipo M son las más numerosos (más comunes en el sol), el número máximo de detección de eventos (X y M) se registra en el año 2014, por otro lado entre 2014 y 2019, el conteo de fulguraciones va disminuyendo hasta hacerse cero en (2018-2019); este comportamiento está relacionado con el inicio del ciclo solar 22, cuando la actividad solar es casi nula por año y las regiones activas presentan pocos eventos de fulguraciones de otras.

### ***Criterio 2: Tiempo de ocurrencia entre eventos registrados***

Utilizando este criterio se seleccionará regiones activas, considerando que el número de fulguraciones solares que ocurren en la región activa (región solar), por día, sean menores que 6 y estos se encuentren separados en un periodo máximo de dos horas. Porque, al observar en diferentes bandas del espectro electromagnético, si las fulguraciones solares son consecutivas (intervalos  $< 1/2$  hora) pueden superponerse uno sobre otro en los datos, afectando directamente las mediciones de flujo medido por los sensores de los instrumentos. Además, que dificulta conocer, si el máximo en el flujo medido es generado por la fulguración solar estudiada u otro tipo de fenómeno ocurrido dentro del mismo periodo de tiempo.

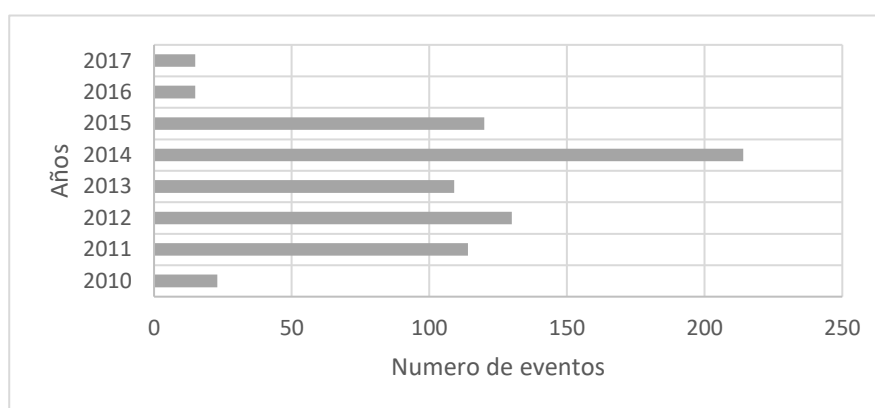


Figura 3.5. Distribución total del número de eventos en las regiones activas por año.  
Fuente: Elaboración propia.

Otra de las razones para la aplicación de este filtro, es que al realizar la modelación numérica del plasma se necesita seleccionar una región, donde los eventos presenten una forma simple, puesto que mayor complejidad (eventos consecutivos), requiere de mayor costo computacional.

Aplicando este criterio el número de eventos en las regiones activas por año (ver anexo A) fue 205 (766 fulguraciones solares totales) en los 7 años de estudio.

### ***Criterio 3: Intervalo de tiempo del evento***

Con este criterio seleccionamos las regiones cuyas fulguraciones solares, ocurran entre las 14 UT a 22 UT (Universal Time) puesto que los datos, deben coincidir con la hora de observación peruana. Los datos filtrados se muestran en las siguientes en las tablas presentadas en el anexo A, con un total de 116 regiones en los 7 años de estudio.

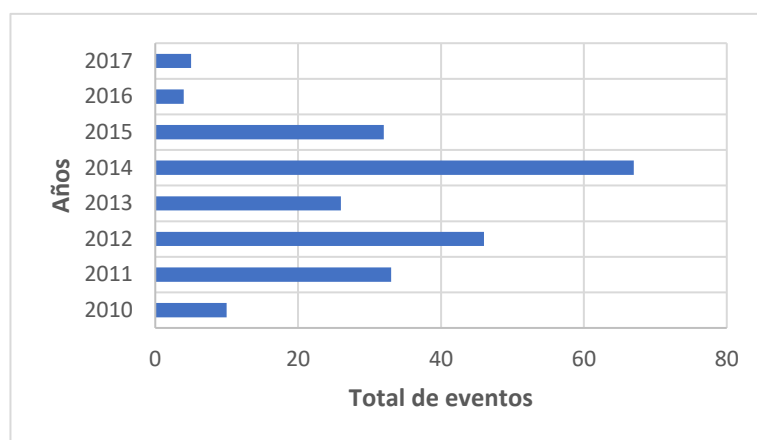


Figura 3.6. Distribución total del número de fulguraciones solares en las regiones activas por año.  
Fuente: Elaboración propia.

### ***Criterio 4: Posición en el sol de la región activa***

En este criterio se selecciona la region activa en base a su ubicación dentro del limbo solar (area celeste de la figura), debido a que se busca describir una fulguración solar, que este asociada a una prominencia, cuya vista lateral permite describir la evolución de los campos magneticos (cuerda de flujo).

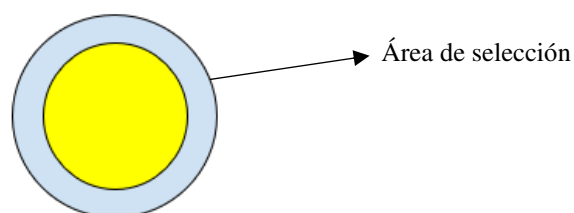


Figura 3.7. Área de selección azul dentro de la Fotosfera Solar  
Fuente: Elaboración propia.

Para poder aplicar esta selección visual, se usa imágenes de todo el disco solar en el filtro H-alpha (cromosfera) de Big Bear Solar Observatory (BBSO), de la página web de Solar Monitor.Org. Ya que la misma contiene una base de datos amplia del sol en diferentes bandas del espectro electromagnético por años, de los filtros ofrecidos se eligió el de H-Alpha, pues facilita la inspección visual de las regiones activas (área con campo magnéticos intensos), que al tener un color amarillo sobresalen sobre el área solar además de poder ubicar la prominencia y hacer el seguimiento de la misma en el tiempo. El total de numero de regiones seleccionadas fue 30.

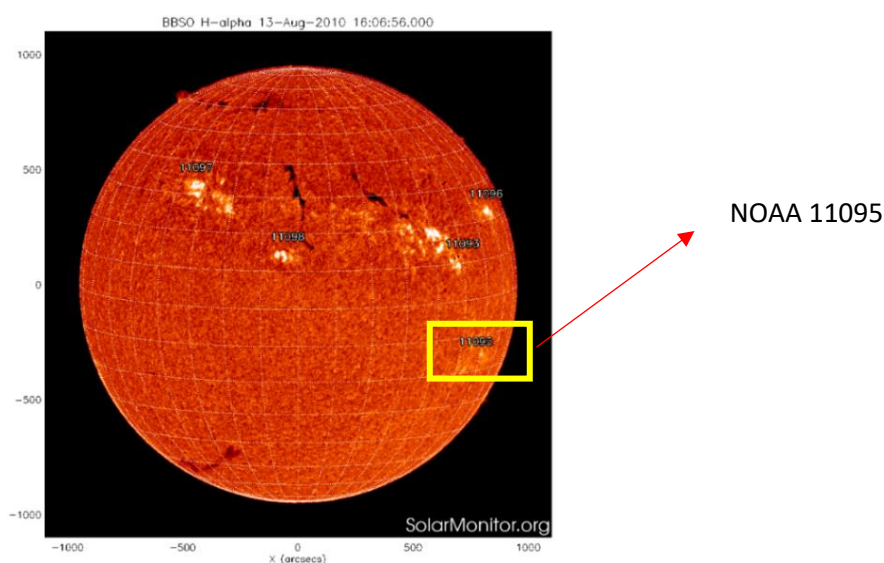


Figura 3.8.Sol  
Imagen en filtro H-ALPHA del Día 13 de agosto del 2010 de la cromosfera solar. Las regiones activas son las cuatro áreas de color amarillo con el numero colocado por NOAA.  
Fuente: Solar.monitor.org

Tabla 3.2. Numero de regiones activas y características de la misma.

Hoy/ Ayer Regiones activas NOAA			
Numero NOAA	Ultima posición	Clase Hall	Numero de Manchas solares
11093	N10W52 (737'',94'')	$\alpha/\alpha$	02/02
11096	N22W69(822'',314'')	$\alpha/\beta$	01/07
11097	N32 E30(403'',415'')	$\alpha/\alpha$	01/01
11098	N14W00 (0'',116'')	$\beta/\beta$	06/05
10099	N17W55(744'',212'')	$\beta/-$	13/--

*Esta tabla muestra el numero de la región activa NOAA-(Numero), con la posición, numero de manchas solares y clase Hale. Fuente: SolarMonitor.Org.*

### **Selección final de la región de estudio**

De la muestra final, se eligió la región activa NOAA 11165 ubicada en (S17°O88°) en el sol, puesto que esta área presenta dos fulguraciones solares separados por una hora e información de los mismos en diferentes telescopios terrestres y espaciales lo que ayuda al mejor estudio de evolución de la misma. Los demás candidatos fueron descartados de la selección final por las siguientes razones:

- Los datos del flujo de rayos X GOES no mostraban muy bien la evolución de la fulguración, es decir no se podía distinguir visualmente las fases de la fulguración.
- Los eventos solo eran registrados por un telescopio o por pocas bandas del espectro, lo que no facilita su estudio.
- Los eventos estaban asociados a otros procesos de erupciones de estructuras magnéticas como sigmoides, entre otros.
- No se observaba con facilidad las cuerdas de flujo.

## Región solar Seleccionada

### NOAA 11165

Tabla 3.3. Fulguraciones registradas en la región NOAA 11165.

Día	inicio	pico	Final	Clase	Región
8-Mar-2011	18:08	18:28	18:41	M4.4	11165
8-Mar-2011	19:46	20:16	21:19	M1.4	11165

*Fuente: Elaboración propia.*

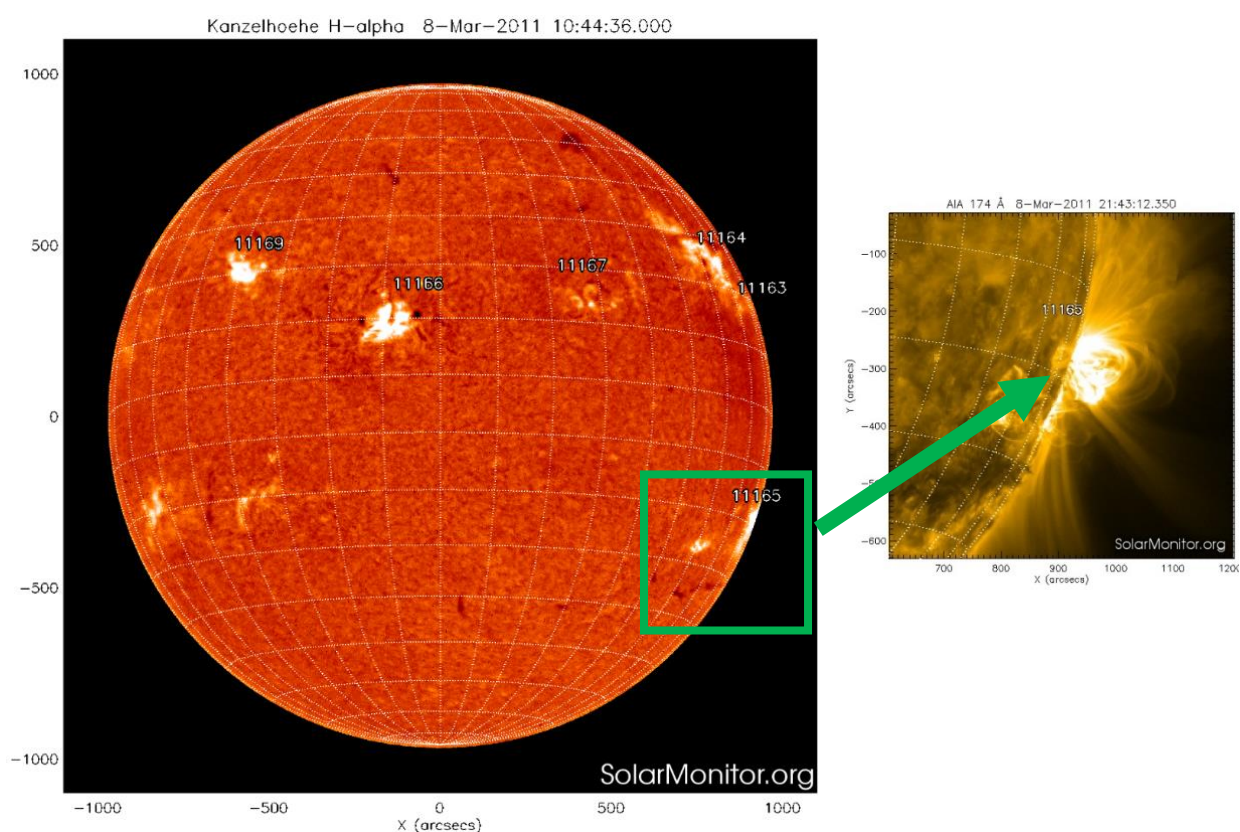


Figura 3.9. El sol 8 de marzo del 2011.

La región seleccionada se encuentra dentro del limbo solar en posición (24 ° Norte, 73° Este), registrando dos eventos de fulguraciones solares tipo M4.4 y M1.4, ambas solo son separadas por 1 hora. Fuente: Solar.monitor.org

## **Paso 2: Selección de la fulguración solar en la Región NOAA 11165**

La región de estudio presento 2 fulguraciones solares M4.4 y M1.4 separadas por una hora, continuación se describirá y se seleccionará a una de ellas como objeto de estudio.

### **I) Descripción de las fulguraciones (M4.4 y M1.4) de la región activa NOAA 11165 con GOES-15**

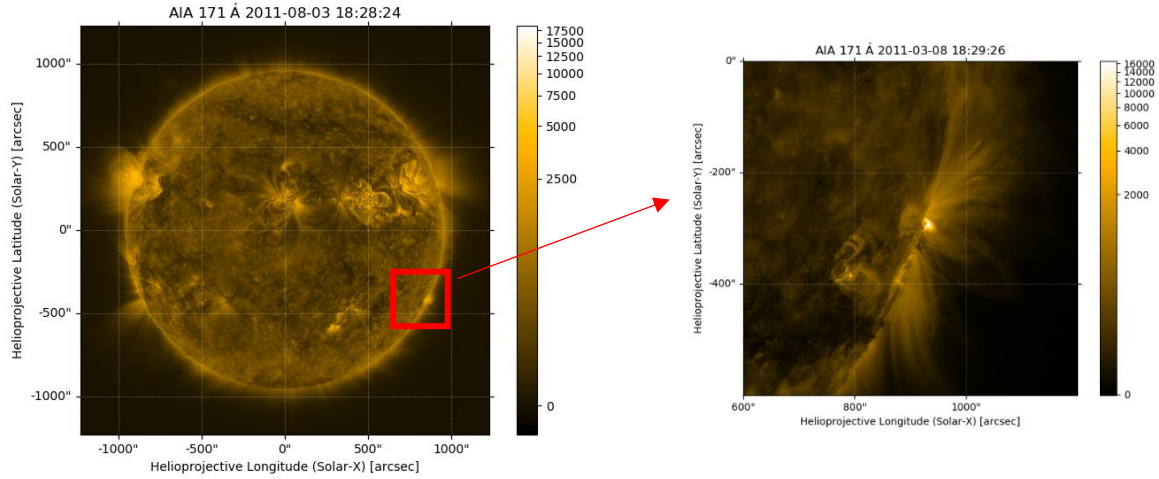
El primer evento, la fulguración solar de tipo M4.4 de acuerdo a la escala de GOES (clasificación en rayos X blandos) localizada en la región de activa (RA) NOAA1 11165 (S17°O88°) tuvo una duración de 33 minutos desde las 18:08 hasta 18:41 UT, alcanzando su valor máximo a las 18:28 UT. Con evidencia en RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) (Lim & Rhessi Team 2002), en la banda de ultravioleta extrema (EUV) de imágenes tomadas por Atmospheric Imaging Assembly(AIA) y Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) a bordo de SDO (Solar Dynamic Observatory) y RSTN(Radio Solar Telescope Network). La región tiene un área de  $750 \text{ arcsec}$  ( $543750\text{km}$ ) con un total aproximado de 16 A 18 manchas solares.

El segundo evento, fue una fulguración solar de tipo M1.4 de acuerdo a la escala de GOES, con una duración desde las 19:46 hasta 21:19 UT, alcanzando su valor máximo a las 20:16 UT. Con evidencia en RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) (Lim & Rhessi Team 2002), en la banda de ultravioleta extrema (EUV) de imágenes tomadas por Atmospheric Imaging Assembly(AIA) y Helioseismic and Magnetic Imager (HMO) a bordo de SDO (Solar Dynamic Observatory) y RSTN(Radio Solar Telescope Network).

Al observar las fulguraciones 1 y 2 (figura 3.10.b), una hora después del pico registrado por la primera fulguración de clase M4.4, el flujo de rayos X decrece hasta que a las 19:46 UT el flujo se eleva y presentar la segunda fulguración M1.4, posterior a las 19:36 el flujo va disminuyendo hasta presentar pocas oscilaciones durante 4 horas. Ambos eventos son relacionados con CME,(Eyecciones de masa coronal). Por otro lado, el pequeño pico a las ~ 19:

00 UT fue de una región activa diferente cerca del centro del disco, como menciona (Su et al ,2012).

a)



b)

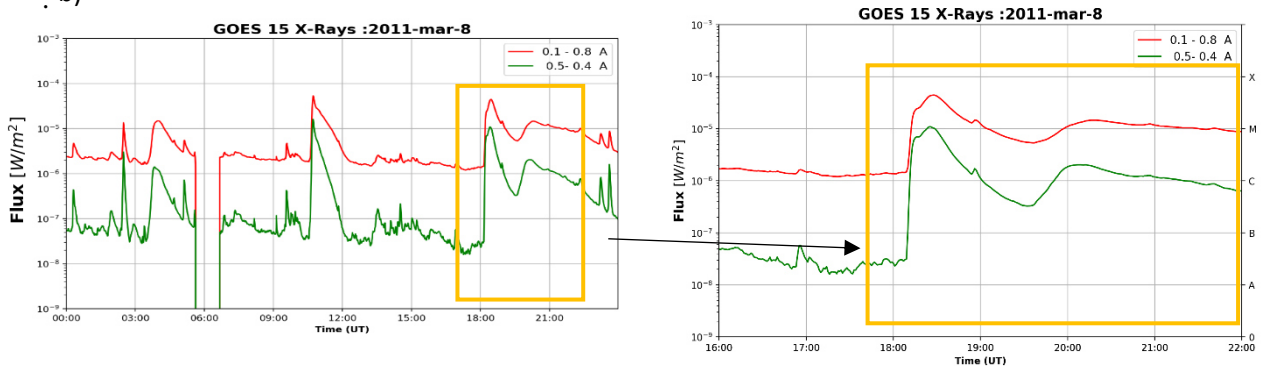


Figura 3.10. Fulguración de estudio M4.4 ocho de marzo del 2011

**a)** El disco solar observado por AIA/ SDO, en la banda de AIA 171 Å, la región activa se hace presente en el recuadro rojo. Fuente: AIA/SDO. **b)** Datos de emisión de rayos X del satélite GOES. El cual muestra que el sol en el día de estudio 8 de marzo del 2011, estuvo bastante activo registrando eventos M y C, que se encuentran fuera de este estudio, por las razones expresadas en la sección anterior. El cuadro amarillo enmarca el tiempo de estudio de las fulguraciones solares. Fuente: AIA/SDO y GOES.



### III) Resumen de la región activa NOAA 11165 de la fulguración solar M4.4

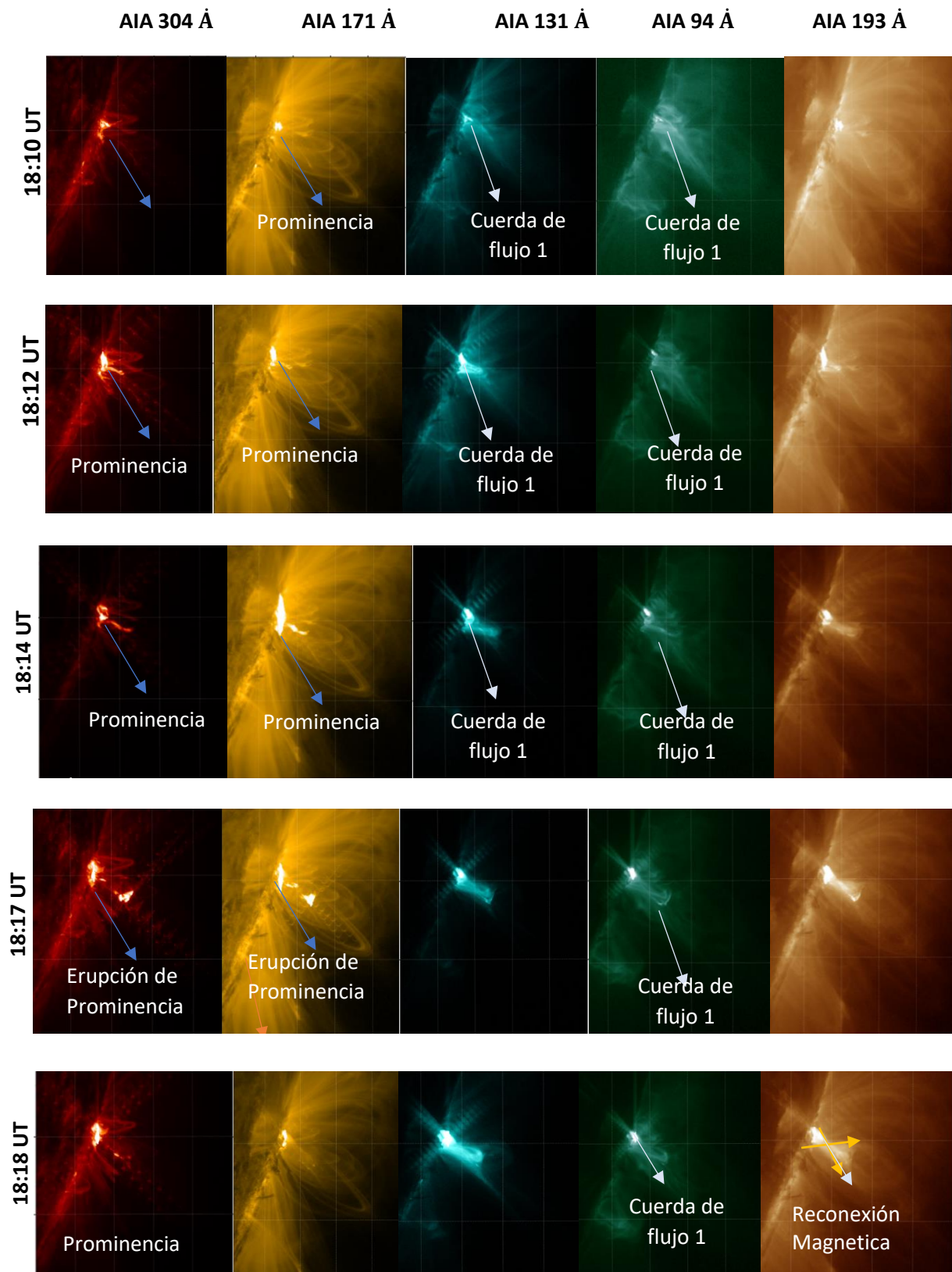


Figura 3.11. Evolución del evento de la región activa AIA 304 Å , 171 Å , 131,94 Å y 193 Å .  
Fuente: AIA/SDO.

### III) Resumen de la región activa NOAA 11165 de la fulguración solar m1.4

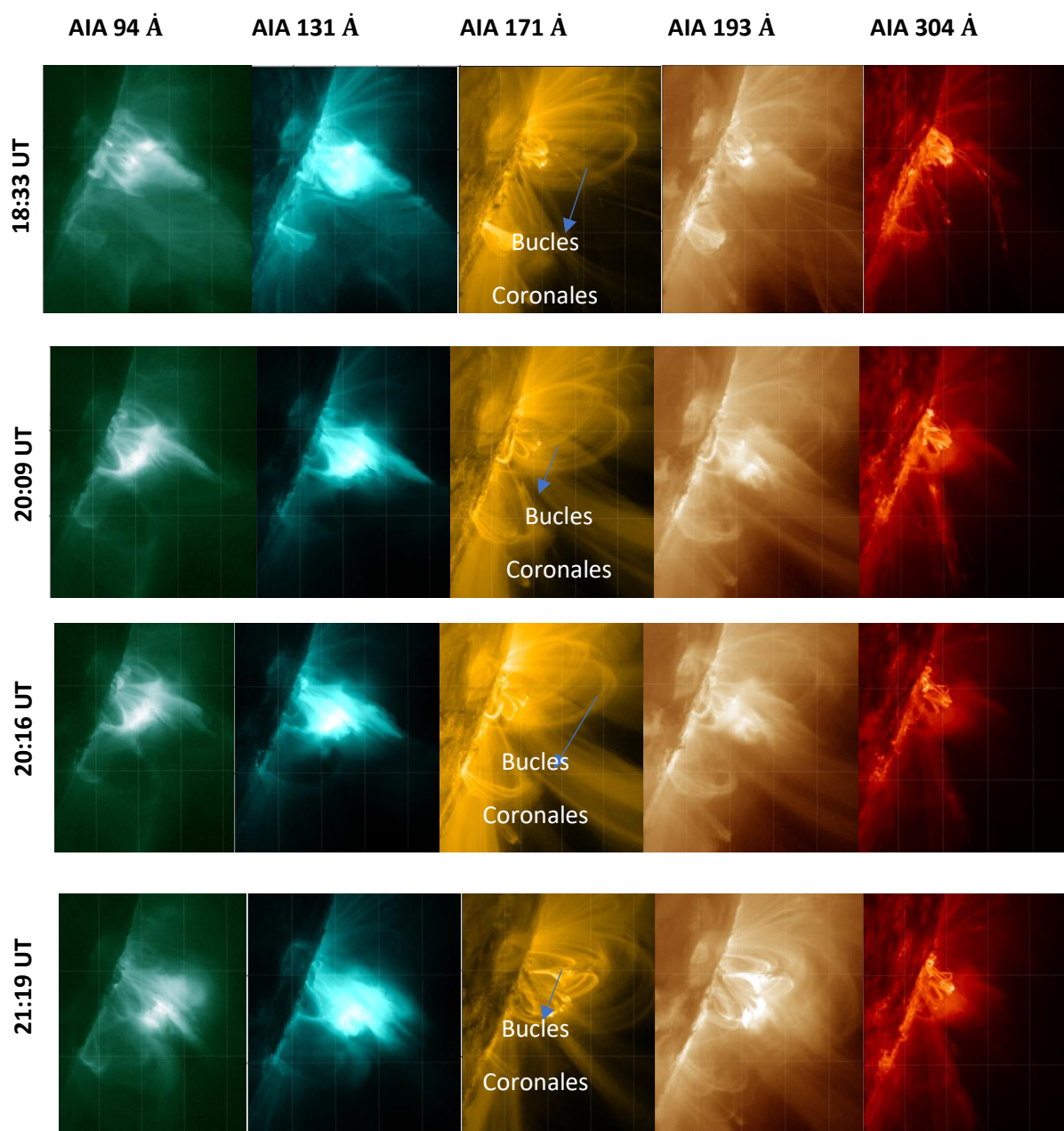


Figura 3.12. Evolución del evento de la región activa AIA 94 Å ,131 Å ,171 Å ,193 Å y 304 Å .  
Fuente: AIA/SDO

### 3.4 Selección Final de la fulguración solar de estudio

En las secciones anteriores se estudió la región activa de estudio NOAA 11165 y sus dos eventos M4.4 Y M1.4. Del anterior análisis se concluye que la fulguración solar M4.4 (18:08 UT-18:41UT). Desde las (18:08 -18:33 UT) registra una erupción de prominencia (18:10 UT-18:14 UT) en la cromosfera y corona en la banda 304 Å y 171 Å usando la sonda AIA /SDO. Por otro lado, se observan dos cuerdas de flujo magnéticas (18:10 y 18:33 UT) y (18:30-18:41) en la banda 131 Å y 171 Å AIA /SDO. Además, el fenómeno eruptivo tiene marcas de reconexión magnética, con una eyección de masa coronal asociada a la misma. (Anexo C)

Por otro lado, la región activa NOAA 11165 asociada a la fulguración solar M1.4(segundo evento). Presenta salidas de flujo y una eyección de masa coronal asociada a la misma (Anexo C).

Finalmente se eligió la primera fulguración solar M4.4, ya que presenta una evolución de dos cuerdas de flujo magnéticas notorias y marcas de reconexión magnética, permitiendo describir la fase de liberación de energía y estudiar la causa del inicio de esta fase usando las ecuaciones MHD.

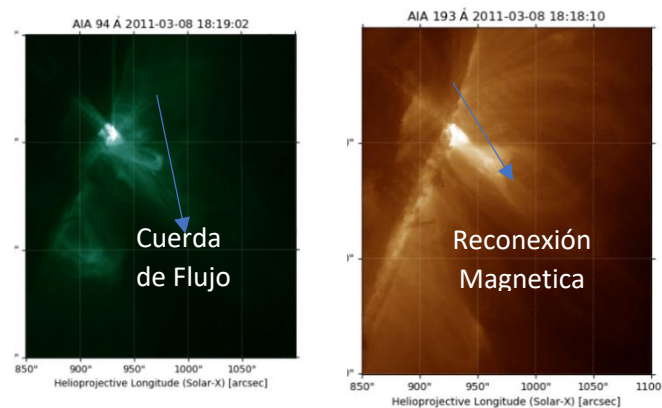


Figura 3.13. Cuerda de Flujo, reconexión magnética. Fuente: AIA/SDO

A continuación, se presentará un esquema de trabajo de la descripción del evento seleccionado:

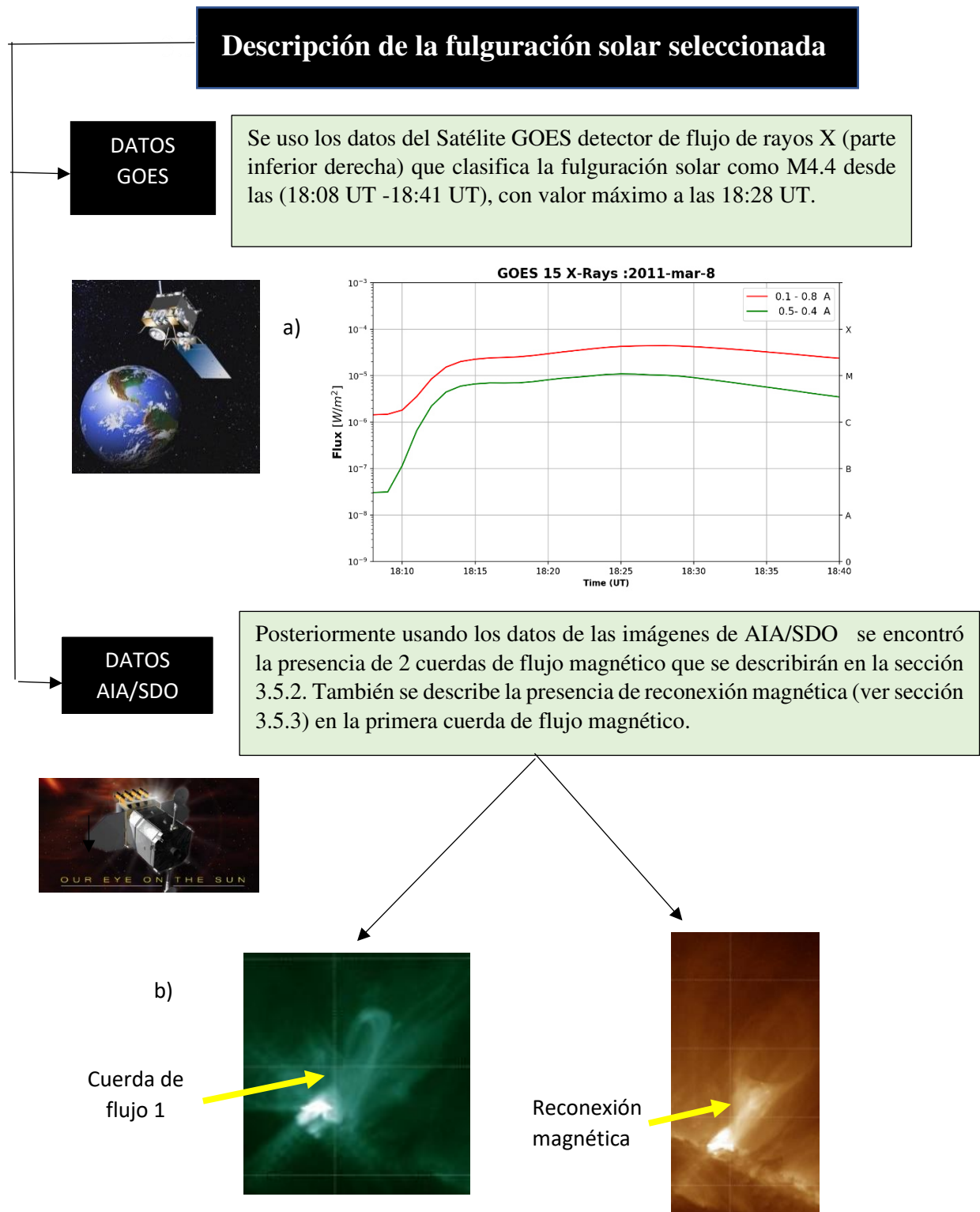


Figura 3.14. Descripción de la fulguración solar de estudio.

a) Grafico de flujo de rayos X GOES (18:10-19:40 UT) b) Cuerda de flujo 1 y reconexión magnética prominencia ocurridos durante el evento M4.4 en la región activa NOAA 11165.

Fuente: GOES y SDO/AIA.



### 3.5.1 Prominencia

Como se mencionó en la sección 2.5.1.1, las prominencias son estructuras magnéticas compuestas de plasma que se ubican sobre la superficie solar (fotosfera). Esta estructura se pudo observar en la región activa NOAA 11165 de la fulguración solar M4.4, en la banda 304 Å de AIA/SDO, que permite estudiar características de plasma y campo magnético de la cromosfera y la región de transición. En la secuencia imágenes de la Figura 3.15 se capturo la vista lateral de una prominencia, como una lámina de plasma más brillante que crece desde las 18:10 UT hasta las 18:14 UT donde erupciona y se desprende, este plasmodio se eleva, tiempo después, más allá de la atmosfera solar hacia el medio interplanetario (Espacio entre tierra y sol) en dirección a Tierra, convirtiéndose en una eyección de masa coronal (ver anexo C).

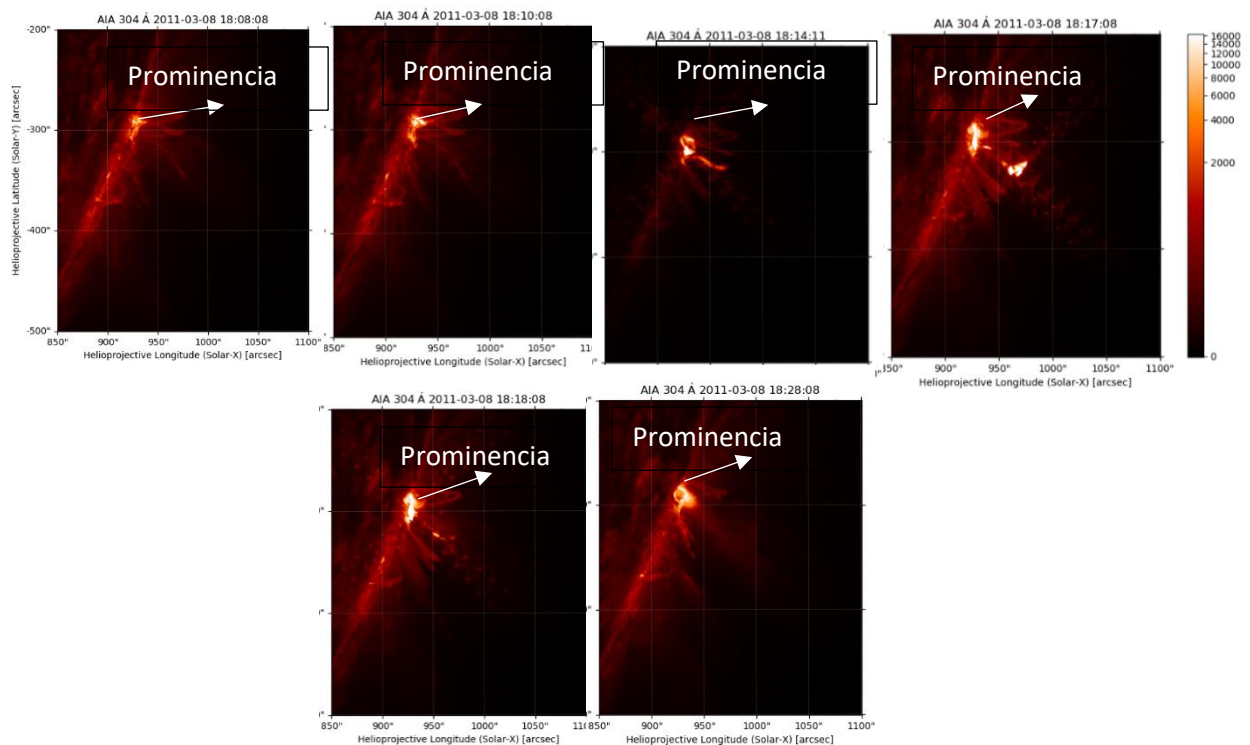


Figura 3.15. Evolución de prominencia.

Evolución de la vista lateral de la prominencia (parte blanca más brillante), desde las 18:08 UT hasta las 18:18 UT en banda AIA/SDO 304. A las 18:14 UT se observa la erupción de prominencia.

Fuente: AIA/SDO.

La presencia de la prominencia (parte más brillante), también es observada en la banda AIA/SDO 171Å, emitida por el hierro-9 (Fe IX) a alrededor de 600 000 °K. En esta banda (Figura 3.16) desde las 18:10 UT se observan los bucles corales (campos magnéticos de mayor tamaño que la prominencia).

Es importante mencionar que la vista lateral de la prominencia, solo se pudo apreciar en las bandas AIA/SDO 304 Å y AIA 171 Å, pero en las misma no se puede identificar las cuerdas de flujo magnético.

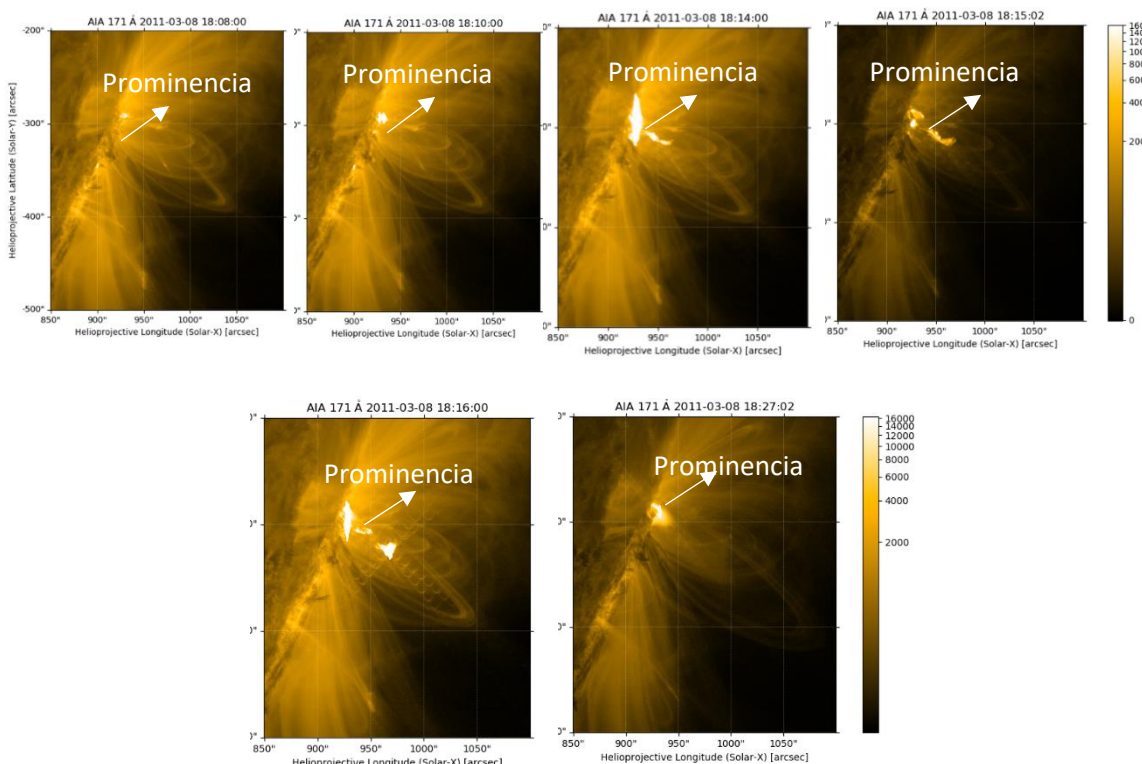


Figura 3.16. Vista lateral de la prominencia desde las 18:08 UT hasta las 18:27 UT.  
Fuente: AIA/SDO

### 3.5.2 Configuración magnética: Cuerdas de Flujo

Como se mencionó en la sección 2.5.1.2, la cuerda de flujo es una configuración magnética que rodea a la prominencia, como se ve en la figura 3.17 la cuerda de flujo es la proyección 2D de los campos magnéticos que rodean a la prominencia en su vista lateral.

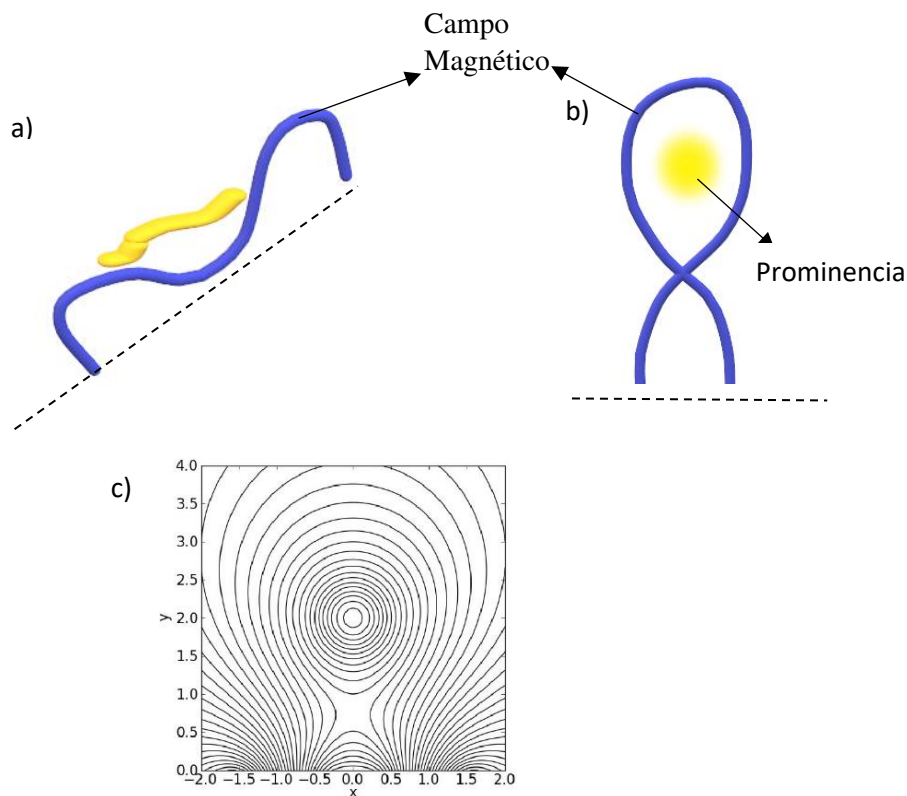


Figura 3.17. Cuerda de Flujo

Figura. a) Campo magnético alrededor de una prominencia en 3D b) proyección del campo magnético en 2D c) Cuerda de flujo configuración magnética 2D de la proyección del campo magnético.

Fuente: AIA/SDO

Los campos magnéticos que se encuentran en la región activa NOAA 11165 son variados, ya que se pueden observar desde bucles magnéticos coronales hasta cuerdas de flujo. La diferencia entre ambas, es que las cuerdas de flujo rodean a la prominencia (evolucionan cinemáticamente) y los bucles coronales son configuraciones estables (flujo estacionario) y de mayor tamaño.

Para describir la configuración magnética de la región de donde procede la fulguración solar M4.4. Se usó la banda AIA 94 ( $\sim 6 \times 10^6$  °K) que estudia la corona alta con la cual se puede observar las zonas donde ocurren las fulguraciones solares. Las partes más brillantes de las imágenes corresponden a regiones de bucles de campo magnético cerrado que atrapan el plasma. (Lemen, 2011).

En el periodo de estudio desde las 18:08 hasta las 18:41 UT cuando según GOES se registra la fulguración solar M4.4, la región activa NOAA en la banda AIA 171 Å, muestra la evolución

o ascenso de dos cuerdas de flujo. Desde las 18:10 UT la primera cuerda aparece y sigue elevándose hasta las 18:19 UT donde alcanza una altura de 90 arcsec –65250 km, para luego desaparecer a las 18:34 UT. La segunda cuerda de Flujo aparece a partir de las 18:30 UT manteniéndose estable hasta las 18:40 UT. La cuerda de flujo 1 se pudo identificar en AIA 131Å esta banda registra información de la corona solar y el material de las fulguraciones solares. Las imágenes suelen estar coloreadas en verde azulado, las temperaturas que puede medir son del orden de hasta 10,000,000 °K. Por otro lado en AIA 193 Å ,la cuerda de flujo también se puede observar.

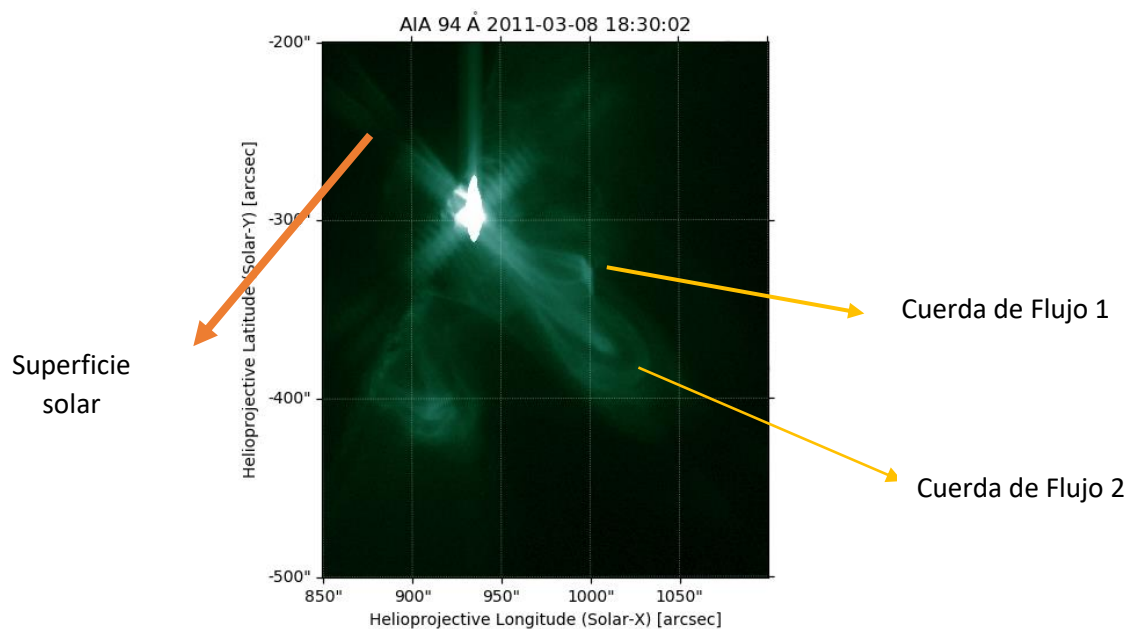


Figura 3.18.Cuerdas de Flujo con AIA 94 Å :  
Fuente: AIA/SDO.

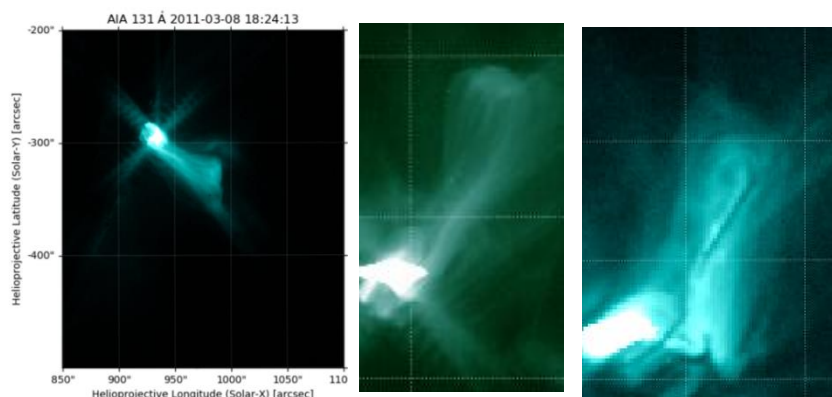


Figura 3.19. Cuerda de flujo  
A) Cuerda de flujo en AIA/SDO 131 b) Comparación de cuerda de flujo de AIA 94 Å y AIA/SDO 131 Å. Fuente: AIA/SDO.



### 3.5.3 Reconexión Magnética

Para poder identificar la reconexión magnética se usó la banda de AIA 193 Å (esta longitud de onda suele estar coloreada en marrón claro), donde desde las 18:08 UT, se pueden observar los bucles magnéticos de la corona solar y la cuerda de flujo 1, a las 18:18 UT en la región más brillante se hace visible debajo de la cuerda de flujo una estructura en forma de X (Figura 3.20.b). Esta estructura es característica de la reconexión magnética en donde los campos se reconectan y se procede a la liberación de energía de la fulguración solar.

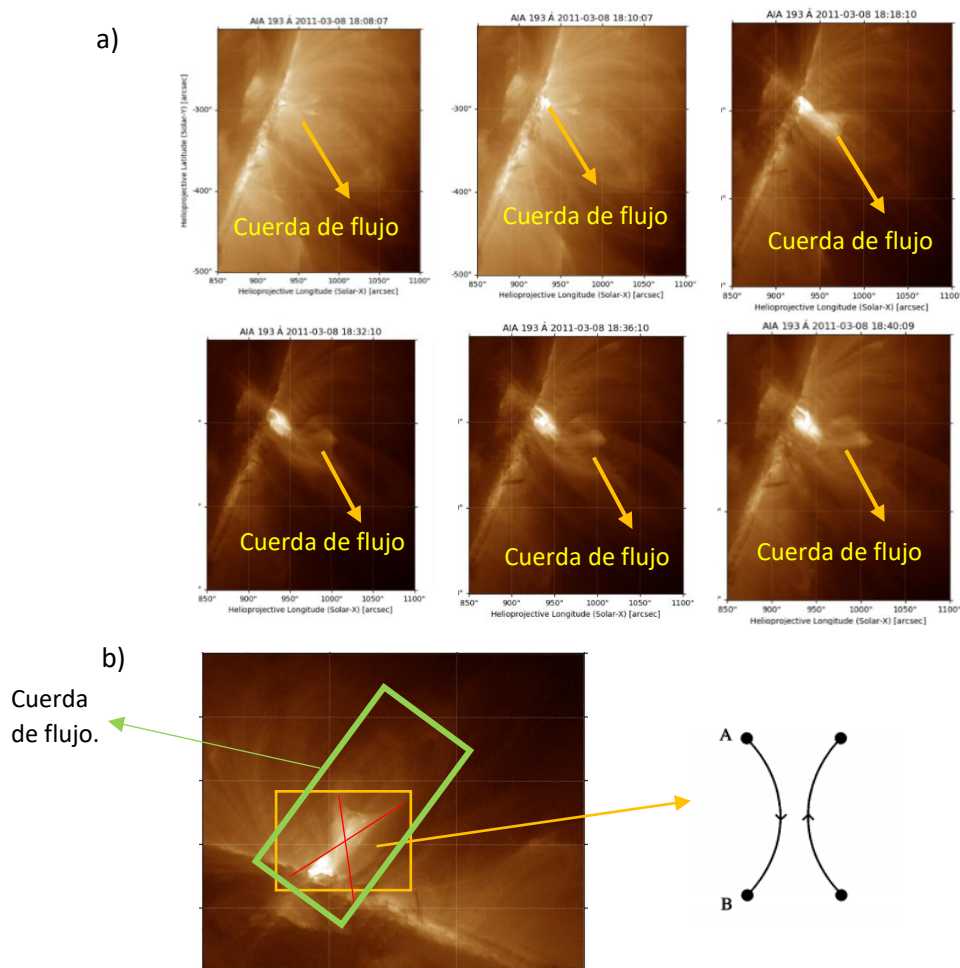


Figura 3.20. Evolución de la cuerda de flujo.

a) Reconexión magnética captada por AIA/SDO 193 b) comparación con la configuración teórica de los campos magnéticos durante un proceso de reconexión magnética. Fuente: AIA/SDO

### **3.5.4 Liberación de energía: reconexión magnética en la cuerda de flujo 1**

En los datos obtenidos por GOES 15, la fulguración solar M4.4 empieza a las 18:0 UT y termina a las 18:40 UT, el valor máximo de flujo se registra a las 18:28 UT, donde la energía máxima es detectada. Usando los datos GOES se pudo identificar el nivel de energía, más no la reconexión magnética de la estructura ocurrido en el sol, por lo que los datos que se recopiló de AIA 193/304/171 y 131 Å fueron valiosos para la descripción del campo magnético y plasma en la región de estudio.

Por lo descrito en las secciones anteriores, se considera en el presente estudio, para estudiar la reconexión magnética (liberación de energía) y la evolución de la cuerda de flujo, el intervalo de tiempo desde 18:14 UT hasta las 18:30 UT, puesto que en este periodo de tiempo se registra: el valor máximo de energía en rayos X (18:28 UT) y la reconexión magnética en la cuerda de flujo de la prominencia aproximadamente entre (18:18 UT-18:19 UT).

Por lo que mencionado líneas arriba, para descubrir la causa de la reconexión magnética en la cuerda de flujo que desencadena la fase de liberación de energía, se eligió describir la evolución cinemática de la cuerda de flujo 1, que desde este punto se llamara cuerda de flujo.

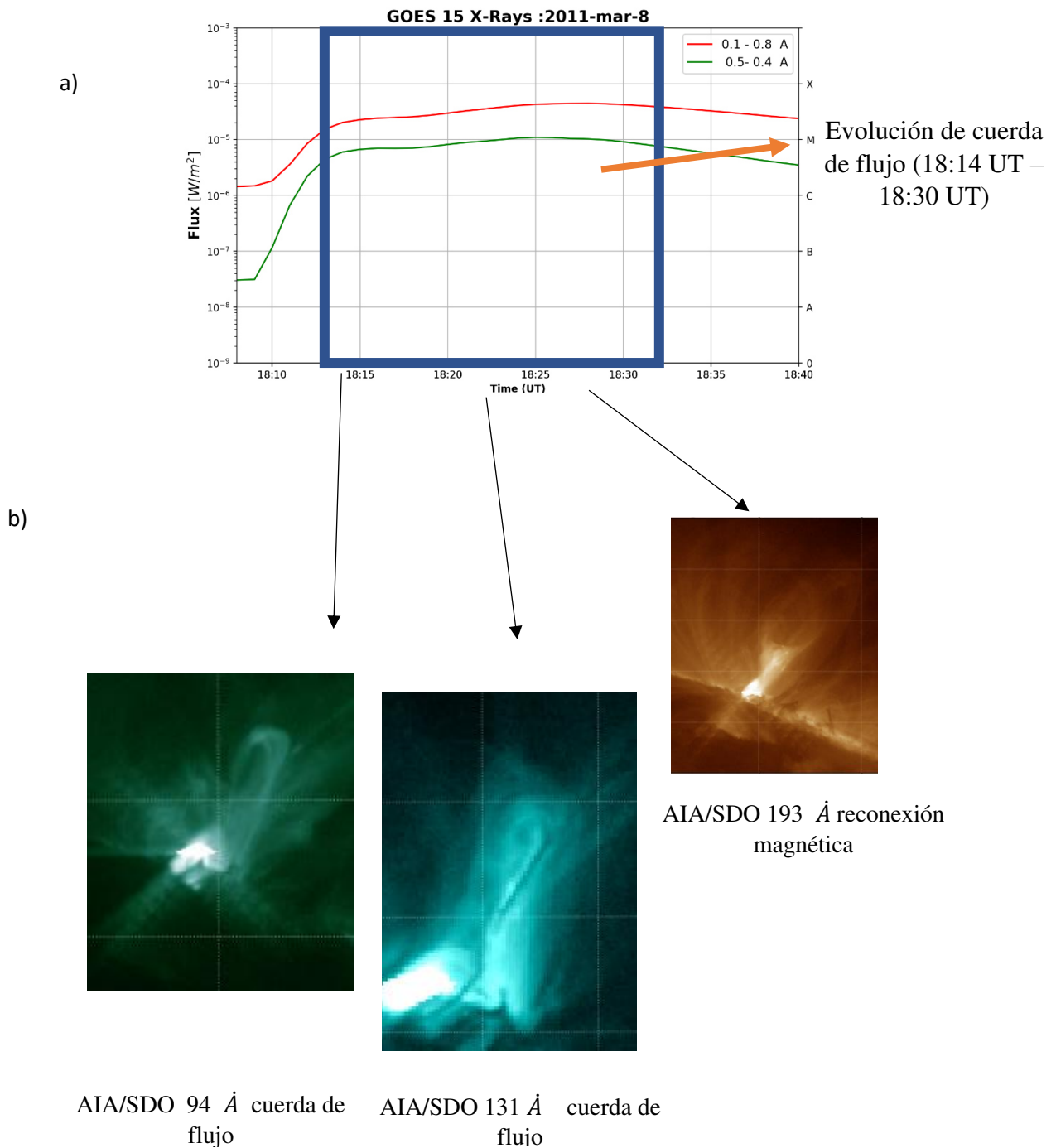


Figura 3.21. Liberación de energía.  
Figura. a) Flujo de rayos X GOES-15 b) Procesos asociados a la liberación de energía. Fuente: AIA/SDO y GOES.

### 3.5.5 Evolución cinemática de la Cuerda de Flujo (18:10 UT-18:33 UT)

Como se describe en la sección anterior la fase de libración de energía está asociada a la reconexión magnética en la cuerda de flujo y la evolución cinemática de la misma. Por lo que se describirá la evolución de la cuerda de flujo, ya que esta no se mantiene estática aumentando su tamaño desde las 18:10 UT hasta reconectarse (18:18 UT- 18:19 UT) y desaparecer a las 18:34 UT.

Se eligió la banda de AIA 94 Å, para describir la evolución de la cuerda de flujo magnética en el tiempo, pues en esta se puede apreciar con mayor claridad la estructura de la misma. Para la reconstrucción de la gráfica altura de la cuerda de flujo vs Tiempo, se eligió un punto de referencia (p1) (Figura 3.22), para dar seguimiento al crecimiento de la cuerda de flujo, cabe mencionar que este método también lo usa (Tripathi et al, 2013) en el estudio de la evolución temporal de la erupción de un filamento.

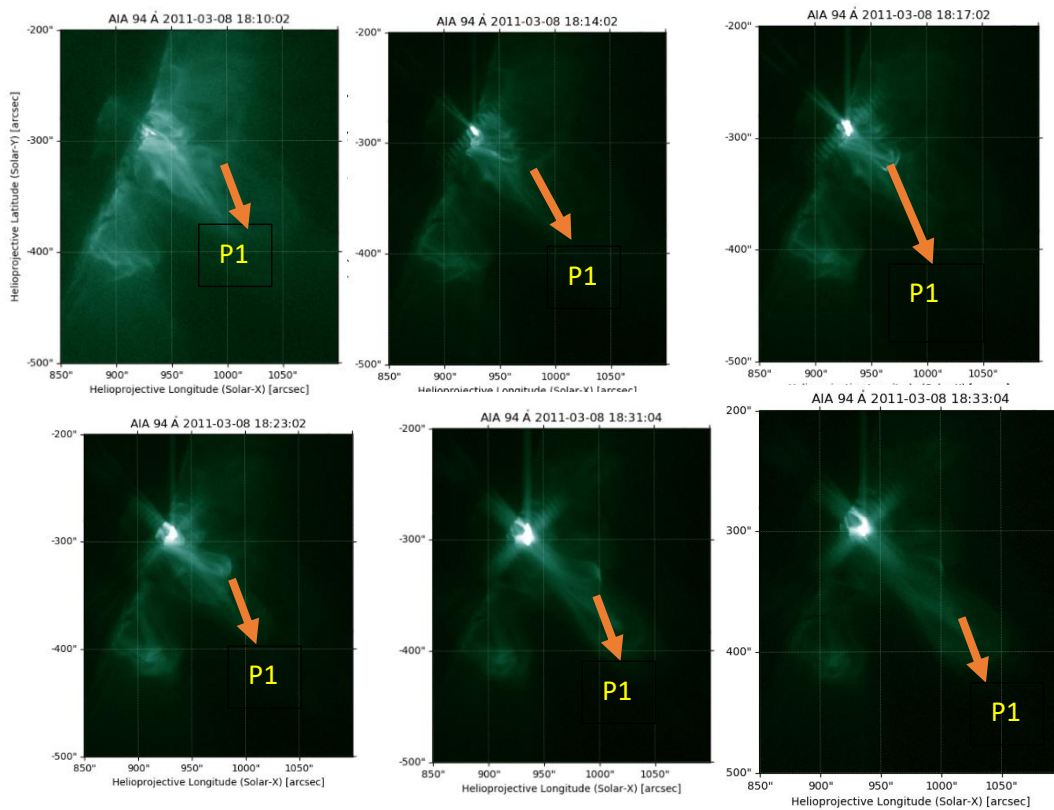


Figura 3.22. Evolución de la cuerda de flujo magnético en AIA 94 Å Fuente: AIA/SDO.

Tabla 3.4. Tiempo y altura.

Tiempo	Altura (km)
18:14	61625
18:15	63075
18:16	63800
18:17	64525
18:18	65250
18:22	68875
18:25	71050
18:28	73225
18:29	75400
18:30	76100.02

Fuente: Elaboración propia.

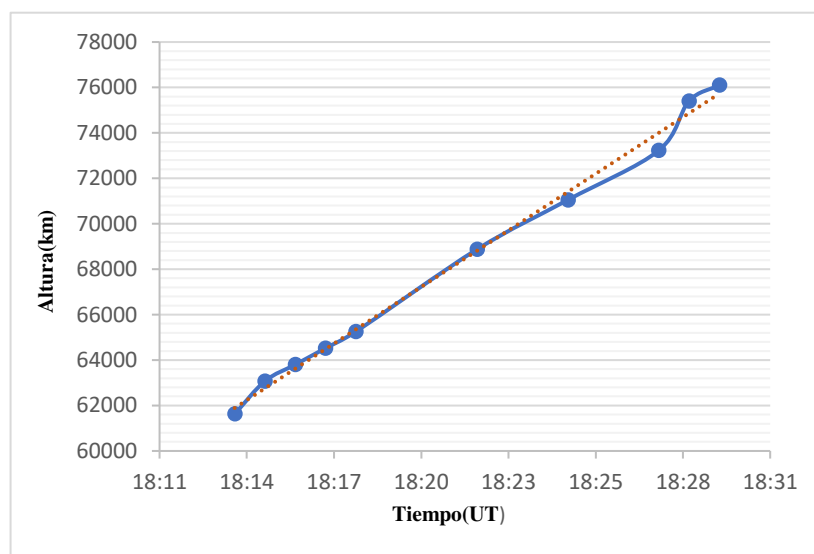


Figura 3.23. Gráfico Altura-tiempo cuerda de flujo 1.

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.6 Cálculo de Velocidades en la cuerda de flujo 1

Se calculó la velocidad de elevación de la cuerda de flujo usando la fórmula (48), donde la altura se extrae de los puntos de recorrido de la cuerda de flujo descritos en la sección anterior:

$$velocidad = \frac{altura\ recorrida}{tiempo} (m/s) \quad (48)$$

Tabla 3.5. Tiempo vs velocidad.

Tiempo	Velocidad(km/s)
18:15	24.1666667
18:16	12.0833333
18:17	12.0833333
18:18	12.0833333
18:22	15.1041667
18:25	12.0833333
18:28	12.0833333
18:29	36.25
18:30	11.667

Fuente: Elaboración propia.

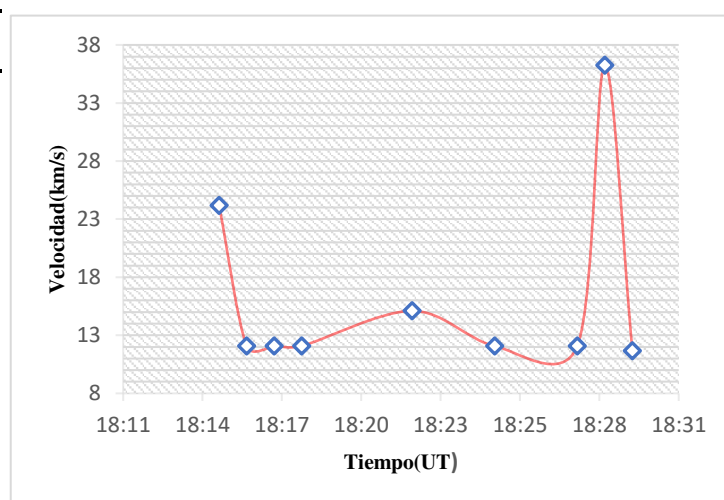


Figura 3.24. Velocidad de la cuerda de flujo.

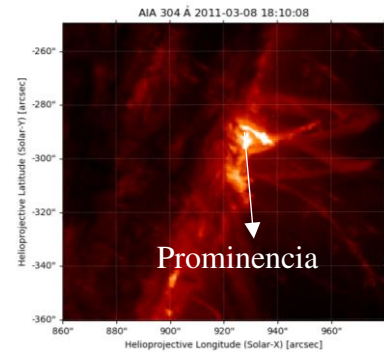
Fuente: elaboración propia.

## Resumen de las Etapas de la fulguración M4.4 del 8 de marzo del 2011

### ETAPA DE ACUMULACION DE ENERGIA

La energía de la fulguración solar se acumula en la prominencia (estructura magnética compuesta del plasma) en la región NOAA 11165.

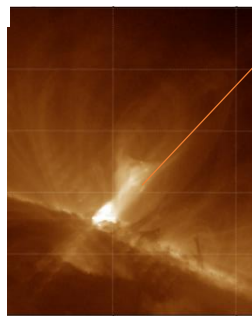
a)



### ETAPA DE LIBERACION DE ENERGIA

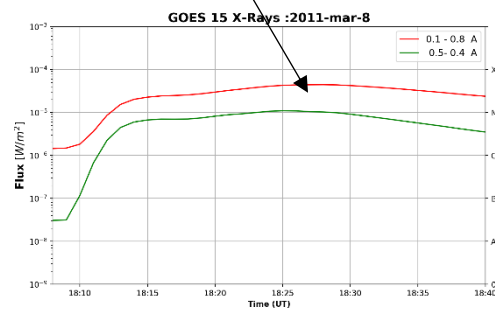
La energía se libera en la reconexión magnética de la cuerda de flujo que rodea a la prominencia entre aproximadamente las (18:18-18:19 UT) UT. El telescopio GOES 15 detecta la fulguración solar desde las 18:10 UT hasta 18:40 UT. Contabilizando los valores máximos de flujo desde las 18:14 UT hasta las 18:30 UT.

b)



Reconexión  
magnética

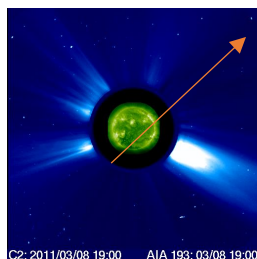
Fulguración Solar tipo M4.4



### ETAPA DE TRANSPORTE DE ENERGIA

Se produce una eyección de masa Coronal a las 19:00 UT asociada a la región NOAA 1165.

c)



Sol

Eyección de  
Masa Coronal

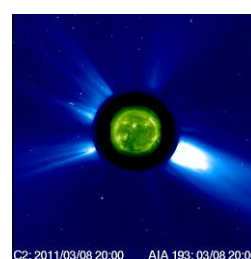
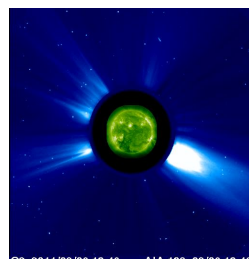


Figura 3.25. Esquema de etapas de fulguración solar

a) Prominencia b) reconexión magnética y fulguración solar M4.4 c) Eyección de masa coronal.

Fuente: GOES, SDO/AIA Y SOHO.

## 4 . Capítulo IV: Modelo de Simulación Numérica

### 4.1 Caso de estudio y Objetivo de simulación

El caso de estudio es la fase de liberación de energía de la fulguración solar M4.4, (ver figura 4.2) ocurrida en la región NOAA 11165, cuyo campo magnético de la prominencia (cuerda de flujo Figura 4.1.b) en la región de estudio, se reconecta entre ( $\approx 18:18/18:19$  UT), dando inicio a la liberación de energía de la fulguración solar (reconexión magnética) (capítulo 3). En el presente capítulo se mostrará el modelo numérico que se implementará para encontrar la causa de la reconexión magnética en la cuerda de flujo y simular el proceso de elevación de la cuerda de flujo desde las (18:14 UT-18:30 UT).

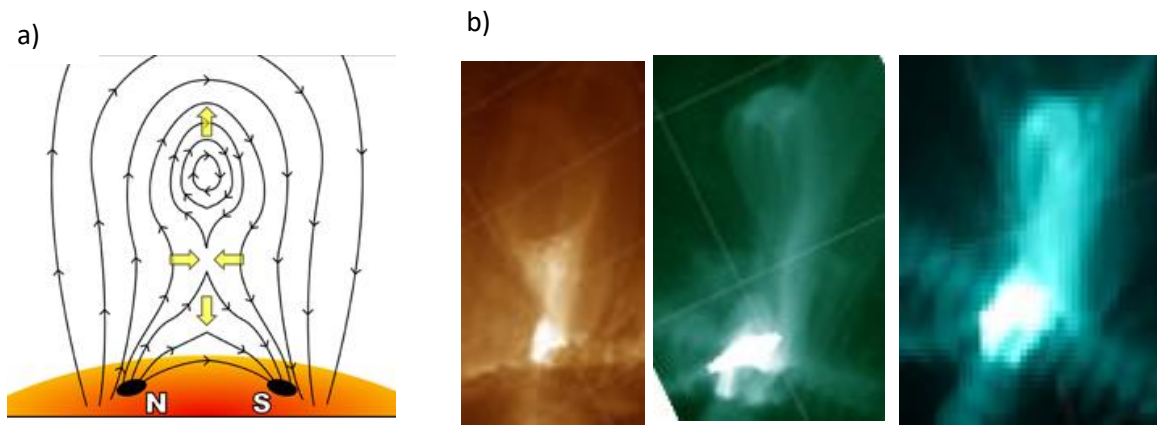


Figura 4.1. a) Cuerda de flujo. Fuente: (NASA2005). b) observaciones de cuerda de flujo asociada a la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 en AIA 193 Å, 94 Å y 131 Å. Fuente: AIA/SDO.

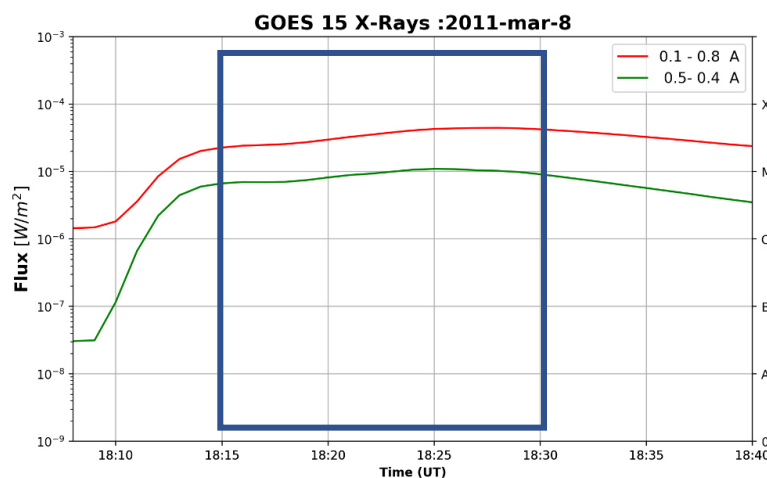


Figura 4.2. Fulguración solar en GOES. Fulguración solar (18:10 UT-18:48 UT). Desde las 18:14 hasta las 18:30 se registra los valores máximos. Fuente: GOES



#### 4.1.1 Cuerda de Flujo Magnética de la región NOAA 11165

La estructura magnética de la prominencia es llamada cuerda de flujo, la cual es una proyección 2D de la vista lateral del mismo. Como se observa en la figura 4.3.c las líneas azules representan la cuerda de flujo. Por otro lado, en la Figura 4.4, se aprecia la cuerda de flujo de la prominencia, asociada a la fulguración solar, vista en diferentes bandas del (AIA/SDO). En el capítulo 3 se describió la evolución cinemática de la cuerda de flujo.

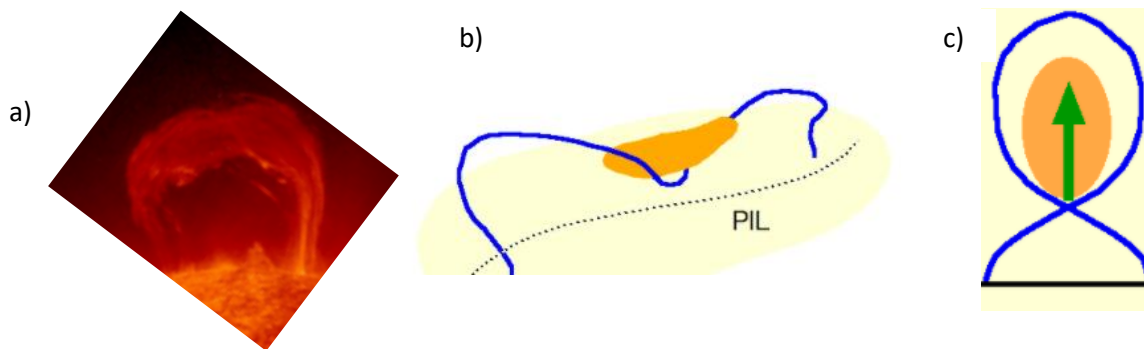


Figura 4.3. Prominencia en diferentes perspectivas.

- a) Prominencia en la atmosfera solar (plasma en forma de arco) en vista lateral.
- b) Representación del campo magnético que sostiene la prominencia en azul y en naranja la prominencia en vista superior en 3D. Fuente: (Magara,2011)
- c) Proyección 2D de las línea de campo magnético que rodea la prominencia, llamada **cuerda de flujo magnético**. Fuente: (Magara,2011)

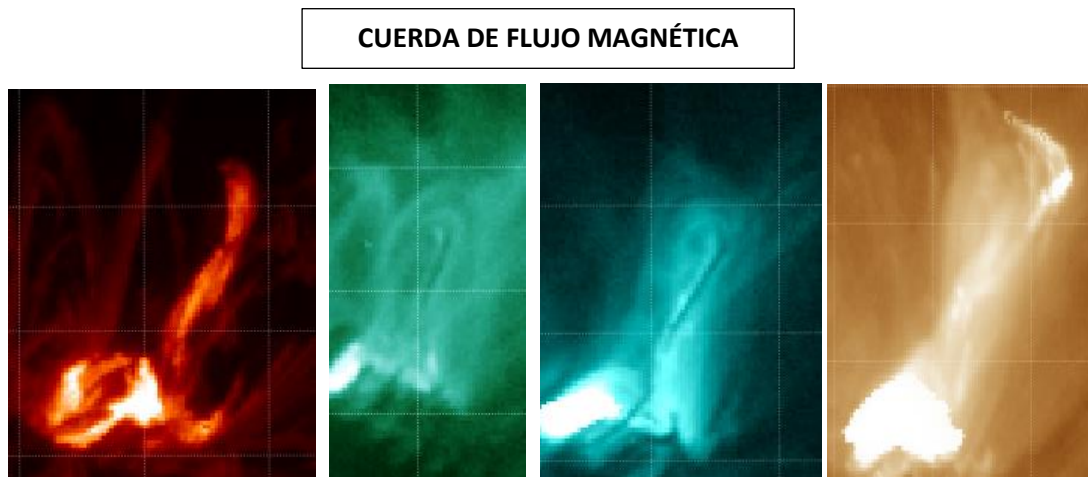


Figura 4.4. Cuerda de flujo

- a) Secuencia de imágenes de la cuerda de flujo en los filtros (AIA/SDO) 304 Å, 94 Å, 131 Å, 171 Å, del 8 de marzo del 2011.



## 4.2 Causa de la reconexión magnética en la cuerda de flujo: la emergencia de flujo junto con las condiciones de presión y resistividad inicial

Ya que el objetivo de la investigación es encontrar la estructura magnética y las condiciones iniciales en el plasma que desencadenan el inicio de la etapa de liberación de energía magnética (reconexión magnética en la cuerda de flujo) de la fulguración solar M4.4. Se plantea como causantes de la misma a: la emergencia de flujo (sección 4.2.1) junto con el rol de la presión y resistividad inicial (sección 4.2.8).

### 4.2.1 Emergencia de flujo

Se ha manejado muchas hipótesis sobre la causa de la desestabilización y posterior reconexión de los campos magnéticos en una prominencia. Una de la más empleada por la comunidad científica (Feynman 1995; Chen y Shibata, 2000) la cual tomaremos como base para esta investigación, es la que considera la presencia de un flujo magnético emergente que interactúa con la cuerda de flujo generando la reconexión magnética y la etapa de liberación de energía. Que en algunos casos va acompañado de un desprendimiento de plasma solar (eyección de Masa Coronal) después del proceso de reconexión.

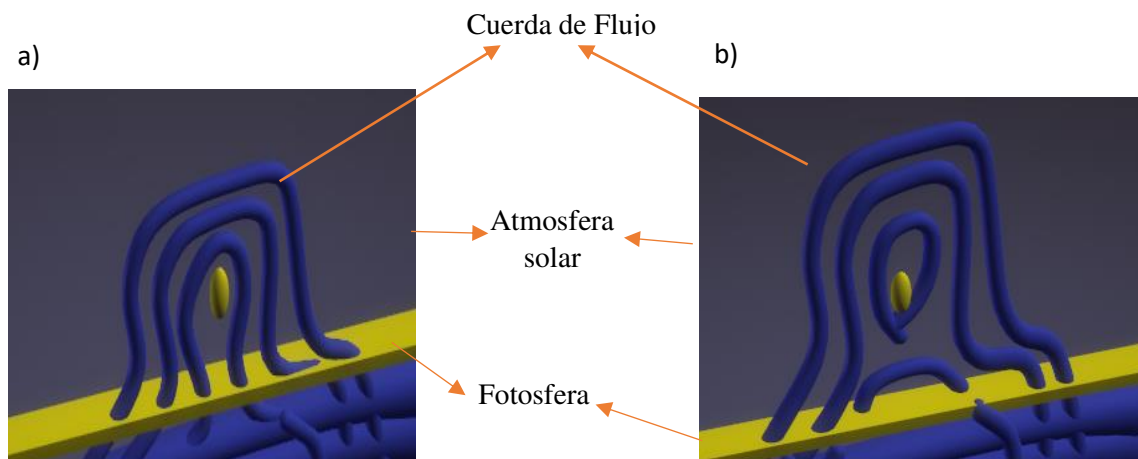


Figura 4.5. Cuerda de flujo

a) Representación de la cuerda de flujo sobre la fotosfera en  $t=0$  b) La cuerda de flujo después de la reconexión. Fuente: Elaboración propia.

## Esquema Temporal del proceso de emergencia de Flujo magnético

- 1) En el  $t=0$  s una cuerda de flujo (campo magnético que rodea la prominencia) está estable (figura 4.6 a) como se identificó en las observaciones con AIA/SDO (Figura 4.6 c).

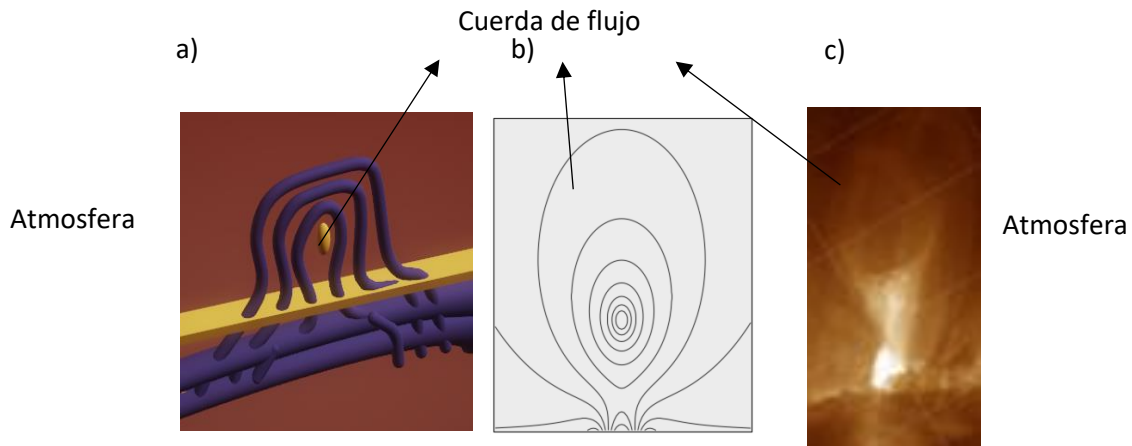


Figura 4.6. Cuerda de flujo en diferentes perspectivas

- a) Es una representación 3D de los campos magnéticos (morado) alrededor de la prominencia sobre la fotosfera (base amarilla). Fuente: Elaboración de propia.
- b) Representación 2D de la cuerda de flujo magnético considerando a la base como fotosfera (superficie solar) y la atmosfera solar. Fuente: Elaboración propia.
- c) Cuerda de flujo observada en AIA 94 Å (2D) sobre la superficie solar en la región NOAA 11165. Fuente: AIA/SDO.

- 2) En el mismo tiempo  $t=0$  s debajo de la fotosfera, superficie solar (zona fuera del límite de las observaciones de AIA/SDO), se plantea la presencia de un flujo magnético (naranja) que emerge de la fotosfera (superficie solar) (Figura 4.7) e interactúa con la cuerda de flujo.

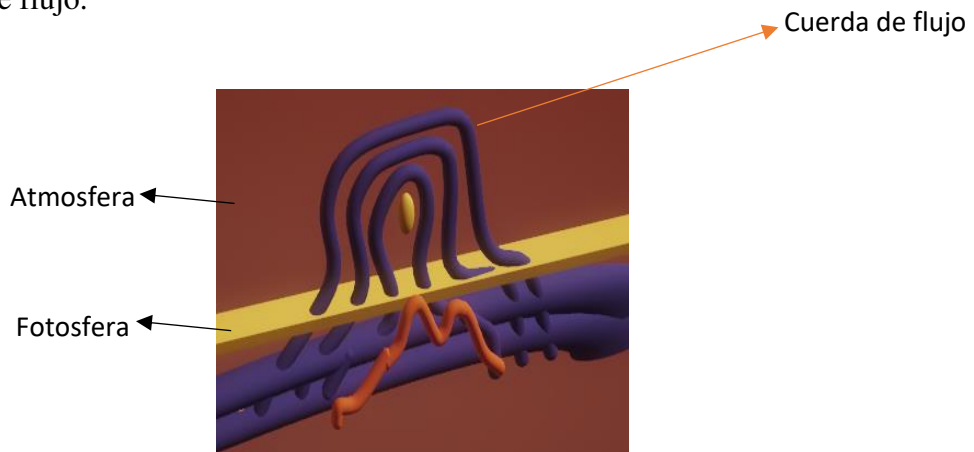


Figura 4.7. Cuerda de flujo interactúa con un flujo emergente. Fuente: Elaboración de propia.

- 3) Cuando el flujo emergente (color naranja) interactúa con la cuerda de flujo esta empieza a perder el equilibrio, por otro lado, en la parte inferior de la cuerda de flujo (figura 4.8), en el punto X, las líneas de campo magnético paralelas de la cuerda de flujo empiezan a unirse, disminuyendo el área que las separa.

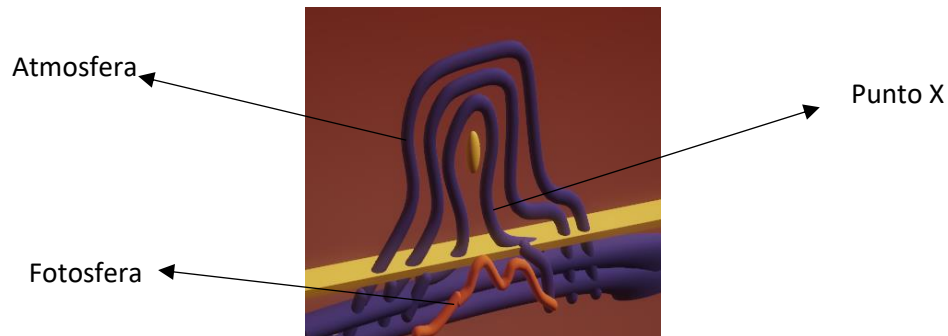


Figura 4.8. Creación de la hoja de corriente eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

- 4) En cuerda de flujo, ocurre la reconexión magnética (Inicio de la fase de liberación de energía de la fulguración solar M4.4) y la cuerda de flujo magnética se corta y se reconectan.

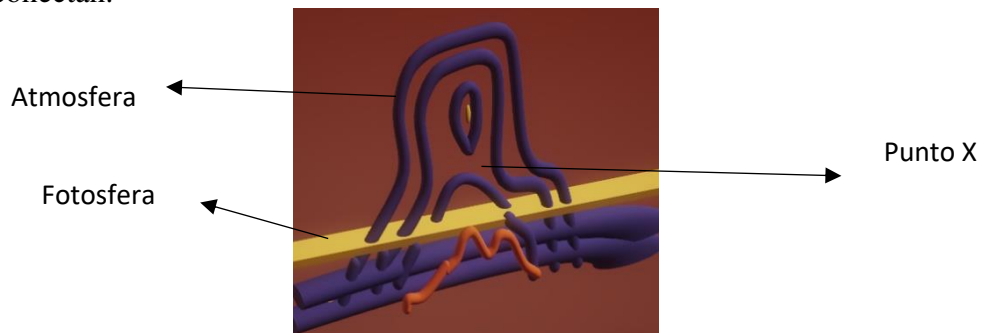


Figura 4.9. Reconexión magnética en el punto X. Fuente: Elaboración propia.

- 5) Finalmente, la cuerda de flujo se eleva con rapidez (Figura 4.10), aumentando aún más su tamaño, cómo se observa en la cuerda de flujo de la prominencia del 8 de marzo del 2011.

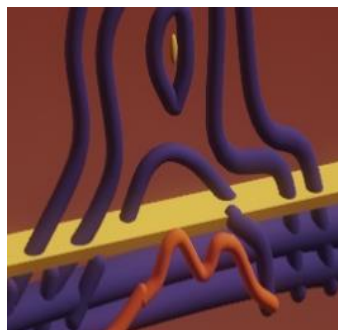


Figura 4.10. Cuerda de flujo elevándose. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.2 Ecuaciones Gobernantes

Ecuaciones magnetohidrodinámicas de dos dimensiones dependientes del tiempo, compresibles y resistivas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{Ecuación de continuidad (49)}$$

$$\frac{\partial (v)}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v + \frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{1}{\rho} j \times B = 0 \quad \text{Ecuación de movimiento (50)}$$

$$\frac{\partial (\Psi)}{\partial t} + v \cdot \nabla \Psi - \eta \Delta \Psi = 0 \quad \text{Ecuación de inducción (51)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \nabla \cdot v - \frac{2(\gamma - 1)\eta}{\rho \beta_o} j \cdot j = 0.0 \quad \text{Ecuación de energía (52)}$$

Donde T= temperatura, V= velocidad,  $\Psi = B = \nabla \times \Psi \hat{e}_z$  flujo de campo magnético,  $\eta$  =resistividad, P = presion, B =campo Magnético, j = densidad de corriente,  $\gamma$  =constante adiabática  $\beta_o$  =beta del plasma,  $\rho$  = densidad.

### 4.2.3 Condiciones Iniciales

El modelo tiene como estructura principal la “Cuerda de flujo (campo magnético alrededor de la prominencia)”, una estructura propuesta por Aly's constraint (Aly 1991; Sturrock 1991), Low & Smith (1993) y Low (1994). Y posteriormente comprobada por observaciones de la sonda SOHO/LASCO desde el año 1997 hasta la actualidad (Chen y Shibata,2000).La cuerda de flujo es también detectada por AIA/SDO en la región NOAA 11165 asociada a la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 como se muestra en la figura.4.11 b.

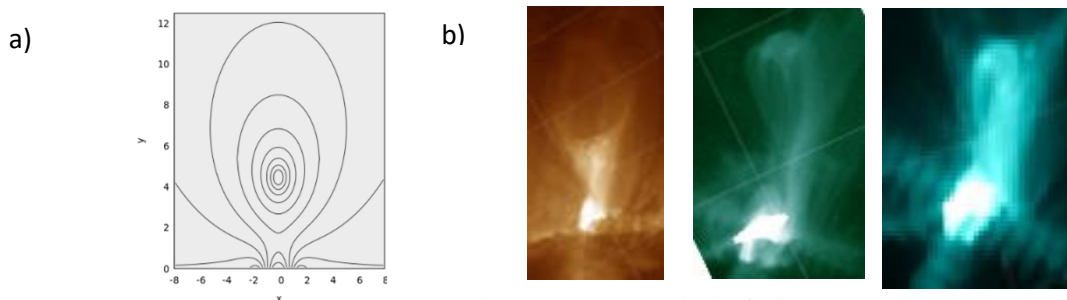


Figura 4.11. Cuerda de flujo

Figura. a) Cuerda de flujo simulada. Fuente: Elaboración propia. b) Observaciones de la cuerda de flujo con AIA/SDO 94,171 y 131 Å. Fuente: AIA/SDO

#### 4.2.3.1 Configuración Magnética Inicial (Chen y Shibata,2000)

La cuerda de Flujo estudiada consta de tres elementos de corriente que constituyen el campo magnético de la misma y permiten su correcta evolución dentro de la simulación, las cuales son: El campo magnético de fondo  $\Psi_b$ , el campo magnético de la imagen de corriente  $\Psi_i$ , campo magnético de la línea de corriente  $\Psi_l$  y campo magnético emergente  $\Psi_e$ .

La función de flujo magnética  $\Psi$  es relacionado con el campo magnética  $B$  por  $B = \nabla \times \Psi \hat{e}_z$

##### a) Campo magnético de fondo

En campo de fondo está expresada con la siguiente función (Forbes,1990):

$$\Psi_b = c \ln \left( \frac{[(x+0.3)^2 + (y+0.3)^2][(x-0.3)^2 + (y+0.3)^2]}{[(x+1.5)^2 + (y+0.3)^2][(x-1.5)^2 + (y+0.3)^2]} \right) \quad (53)$$

De cuatro líneas de corriente en las posiciones  $((+1.5, -0.3); (-0.3, -0.3))$ , con las direcciones “-“, “+”, “+” y “-“, situadas por debajo de la fotosfera. La naturaleza cuadrupolar del campo de fondo de este modelo, ha sido comprobado de manera observacional gracias a el satélite SOHO en 1997 (Howard et al, 1997).

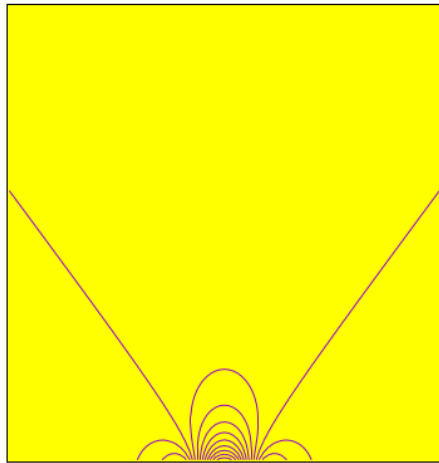


Figura 4.12. Posiciones de los cuatro corrientes en el eje X y Y. Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación 53 “ $c$ ”, es una constante numérica que representa el ancho del campo de fondo, que se calcula a base de prueba y error para obtener mayor estabilidad en la cuerda de flujo.

### b) Campo magnético de Imagen de corriente

La imagen de corriente tiene la siguiente función logarítmica:

$$\psi_i = -\frac{r_o}{2} \ln [x^2 + (y + h)^2] \quad (54)$$

En donde **ro** es el radio inicial de la circunferencia de la línea de corriente y **h** es la posición (x,y) de la misma dentro de la malla de simulación.

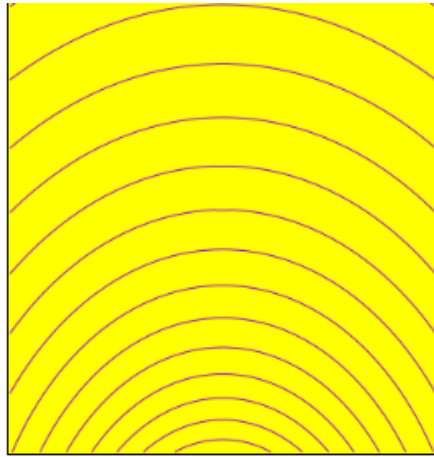


Figura 4.13. Campo de imagen de corriente. Fuente: Elaboración propia.

### c) Campo magnético de la línea de Corriente magnética

Es la función que expresa la estructura de la línea de corriente, ubicada en el punto (0,h), donde. Esta misma tiene un radio  $r_o$ , la cual limita los valores que adquiere la línea de corriente a lo largo del plano X, Y como:

$$\begin{aligned} \psi_l &= \frac{r^2}{2 * r_o} \quad r \leq r_o \\ \psi_l &= \frac{r_o}{2} - r_o \ln(r_o) + r_o \ln(r) \quad r > r_o \end{aligned} \quad (55)$$

Donde  $r = [x^2 + (y - h)^2]^{1/2}$  es el radio de la circunferencia, que ayuda a acotar la función y darle valor numérico, además que al ser un valor dinámico en el plano cartesiano.

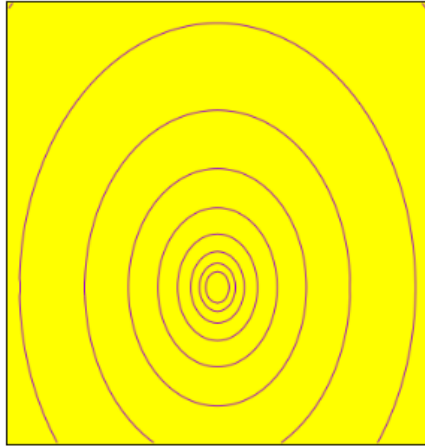


Figura 4.14. La circunferencia ubicada en el punto (0,2) y de radio  $r_0=0.5$ .  
Fuente: Elaboración propia.

**d) Campo magnético del flujo emergente**

$$\psi_e = \frac{t}{te} * a * \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) \quad (t \leq te) \quad (56)$$

Donde  $t$ =tiempo,  $te$  =tiempo de emergencia, el flujo emergente se representa con una función coseno.

**e) Campo Magnético Total**

La configuración Magnética inicial esta expresada entonces por:

$$\psi = \psi_b + \psi_i + \psi_l + \psi_e \quad (57)$$

**Campo total = Campo magnético de fondo + Campos magnético de Imagen de corriente +  
Campo magnético de línea de Corriente+ Campo magnético emergente**

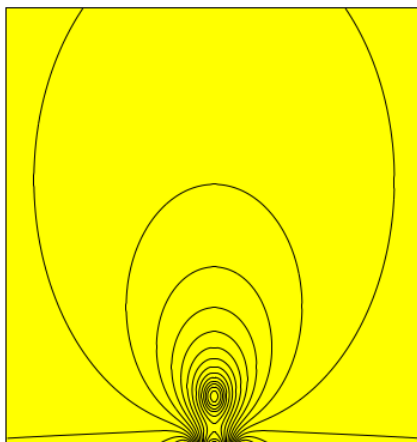


Figura 4.15. Configuración magnética inicial. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3.2 Condición inicial de temperatura, densidad y Presión (Chen y Shibata,2000)

Se asume una temperatura un informe  $T = T_o$ , la distribución de densidad inicial es:

$$\rho/\rho_0 = \begin{cases} 1 + \frac{2}{\beta} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right), & r \leq r_o; \\ 1 & r > r_o; \end{cases} \quad (58)$$

Donde  $\beta$  es la relación del gas con el campo magnético y la presión inicial es  $P = P_o$

#### 4.2.3.3 Función de Resistividad (Chen y Shibata,2000)

La resistividad se expresa como:

$$\eta = \begin{cases} \eta_o \left(1, \left|\frac{j_z}{j_c}\right| - 1\right), & |j_z| \geq j_c ; \\ 0 & |j_z| < j_c ; \end{cases} \quad (59)$$

Donde  $j_c$  es la densidad de corriente eléctrica crítica que este modelo fue  $j_c = 0.5 \frac{A}{m^2}$ .

#### 4.2.4 Malla Computacional

La malla computacional está localizada en el plano cartesiano X-Y. El eje X es paralelo a la superficie solar, mientras que el eje Y es perpendicular a la fotosfera.

Usando los datos extraídos de la cuerda de flujo de AIA/SDO descritos en la sección 3.5, se considero un tamaño de Malla  $-8 < x < 8$  y  $0 < y < 12.5$ , (que esta discretizado como  $(N_x = 100, N_y = 100)$  puntos de malla distribuida de manera uniforme en la dirección **X** y dirección **Y**, donde 1 cm en la figura representa 5000 km, eligiendo los valores de  $c = 0.22, r_o = 0.5, h = 4.5, a = 0.11$  y  $b = 0.6$  para el campo magnético inicial (ecuación 53, 54, 55 y 56) en nuestro caso de estudio.



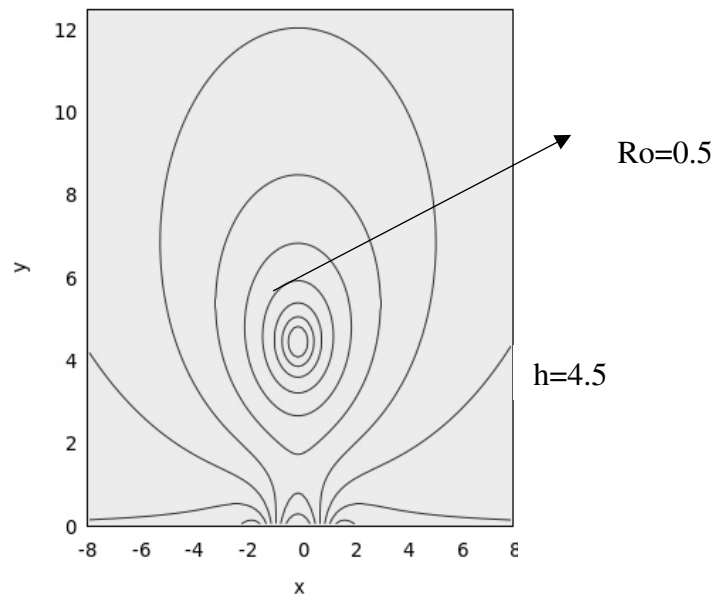


Figura 4.16. Cuerda de flujo  
. Fuente: Elaboración propia.

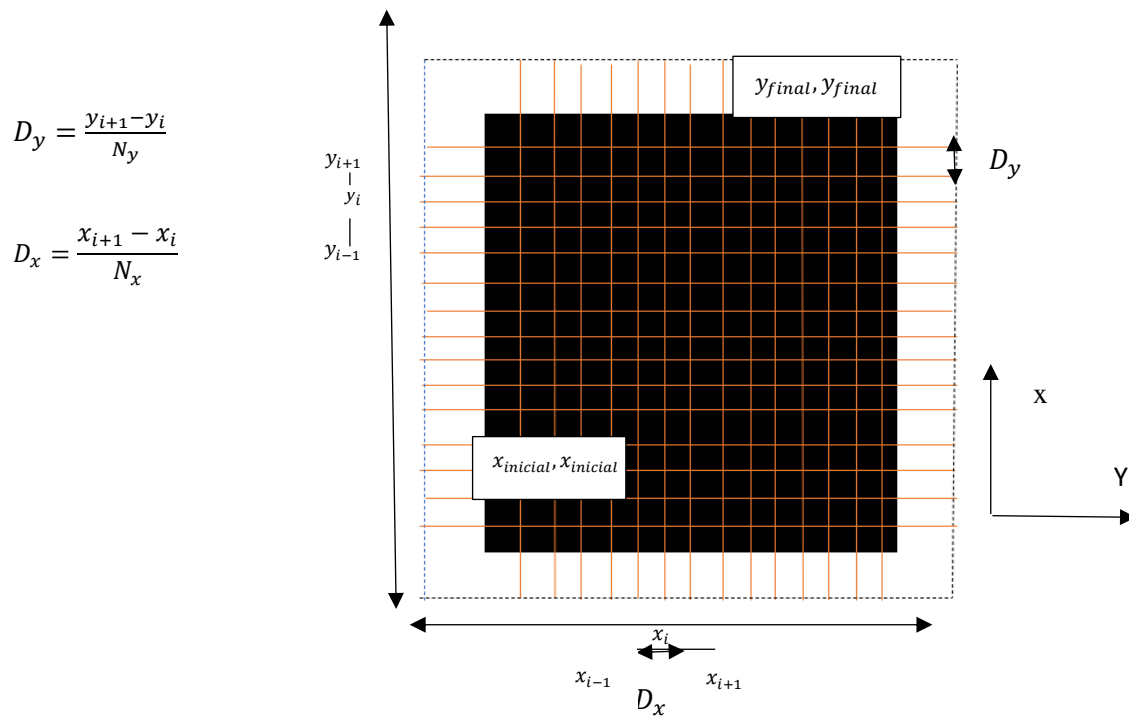


Figura 4.17. Malla Computacional  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5 Condiciones de Borde

Se estableció gradiente cero alrededores del borde, suponiendo que  $\mathbf{n}$  es la dirección de coordenadas ortogonal al plano limite.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial B}{\partial \hat{n}} = 0 \quad \frac{\partial \psi}{\partial \hat{n}} = 0 \quad (60)$$

#### 4.2.6 Tabla de unidades de los parámetros estudiados del modelo.

Tabla 4.1. Unidades de parámetros en el modelo

Símbolo	Cantidad	Unidad
$x, y$	longitud	1cm~5000 km
$T$	Temperatura	$10^6$ °K
$\rho$	Densidad Inicial	$1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$
$v$	Velocidad	500 km/s
$t$	Tiempo	960 s
$\beta_o$	Beta	0.01 (adimensional)
$\gamma$	Constante adiabática	1.2 (adimensional)

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.2.7 Tiempo

Se eligió simular el intervalo entre (18:14 UT-18:30 UT), es decir 960 segundos, usando como base las condiciones iniciales de plasma y campo magnético extraídos del instrumento AIA del telescopio espacial SDO (Capítulo 3) para simular la evolución cinemática de la cuerda de flujo de la prominencia y su reconexión magnética (liberación de energía) de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo en la región NOAA 11165.

#### 4.2.8 Escenarios de simulación: Condiciones iniciales de presión y resistividad

Además de los valores de condiciones iniciales de campo magnético, las condiciones iniciales de presión y resistividad juegan un papel relevante en el desencadenamiento de la reconexión magnética.

Sobre la presión se sabe que contribuye a mantener estable la cuerda de flujo y en cuanto a la resistividad, se conoce teóricamente que aumenta la disipación de corriente eléctrica, generando el rompimiento y posterior reconexión. Es por esta razón que se planteó, qué al usar diferentes valores de presión y resistividad en tres escenarios de simulación además de las condiciones iniciales magnéticas y de plasma generales descritas desde 4.2.1 a 4.2.7, obtendremos diferentes tiempos de reconexión y evolución temporal de la cuerda de flujo.

El rango de presiones iniciales consideradas es de 0.5 Pa a 1.5 Pa y 2.5 Pa, el rango de resistividad va de 0.02  $\Omega.m$  a 0.05  $\Omega.m$ , valores promedios que se consideraron para la atmosfera solar que es nuestra área de simulación. Estos valores se usarán para encontrar los tiempos de reconexión magnética y evolución de cuerda de flujo que se asemejen a los datos observacionales.

Tabla 4.2. Condiciones iniciales de presión en cada escenario de simulación.

Escenarios de simulación	Presión	Resistividad
Primer escenario de simulación	0.5 Pa	0.02 $\Omega.m$
Segundo escenario de simulación	1.5 Pa	0.04 $\Omega.m$
Tercer escenario de simulación	2.0 Pa	0.05 $\Omega.m$

*Fuente: Elaboración propia.*

### 4.3 Software PLUTO

EL software usado para la solución numérica de las ecuaciones 4.2.1, es PLUTO el cual sigue el siguiente esquema de trabajo:

#### 4.3.1 Esquema de Trabajo de PLUTO(Mignone, 2007)

PLUTO está diseñado para integrar un sistema general de leyes de conservación que escribimos como. (Mignone, 2007):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla \cdot F(U) + S(U) \quad (61)$$

U: Vector de cantidades conservadas

S(U): Término fuente

T(U): Es el tensor de rango 2 que contiene los flujos de cada componente

Por lo que el esquema de trabajo es el siguiente:

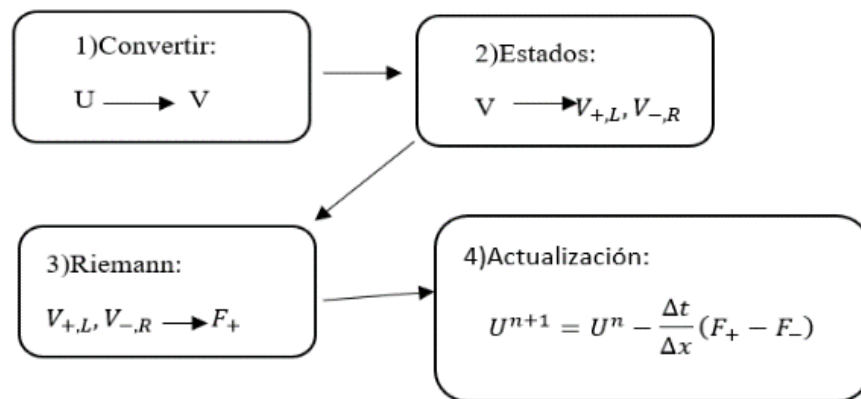


Figura 4.18. Flujo de trabajo en PLUTO. Fuente: Adaptado de (Mignone,2007).

#### **PASO 1:** *Conversión de Variables*

El vector de unidades conservadas es el más usado  $U = (\rho, m, E, B)^T$ , pero en nuestro caso de estudio se eligió trabajar con las variables primitivas que son  $V = (\rho, v, p, \psi)^T$ , el número de variables primitivas varía de acuerdo al tipo de estudio.

## **PASO 2: Selección del Método de Reconstrucción**

Se eligió el esquema TVD (Total Varying diminishing), para nuestro caso de estudio, ya que conserva la monotonidad, no presentando oscilaciones falsas, las cuales suelen generarse en los límites.

## **PASO 3: Solucionador del problema de Riemann**

La solución exacta al problema de Riemann implica, la descomposición de un conjunto de ondas no lineales y puede ser una tarea bastante engorrosa de lograr. (Mignone, 2007). Por lo que PLUTO presenta varios esquemas de solución. Para nuestro caso de estudio se usará el esquema Lax-Friedrichs que es robusto, pero también el solucionador más difusivo y está disponible para todos los módulos.

## **PASO 4: Selección de Método de evolución Temporal**

El paso de tiempo  $t$  está limitado por la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

$$\Delta t = C_a \min_d \left( \frac{\Delta l_{min}^d}{|\lambda_{max}^d|} \right) \quad (62)$$

Con  $\Delta l_{min}^d$  y  $\lambda_{max}^d$  siendo, respectivamente, la longitud de celda más pequeña y la mayor velocidad de señal en la dirección  $d$ . Este número es usado para evaluar la convergencia del sistema, que coloca un límite a los valores que puede asumir dependiendo del método elegido.

En este trabajo se empleará el método Runge Kutta de orden 2(RK2) para la evolución temporal ya que al seleccionar el método de Reconstrucción TVD automáticamente el algoritmo lo elige por defecto y calcula un número de Courant-Friedrichs-Lewy.

## 5 Capítulo V: Resultados

A continuación, se presentará un esquema de trabajo:

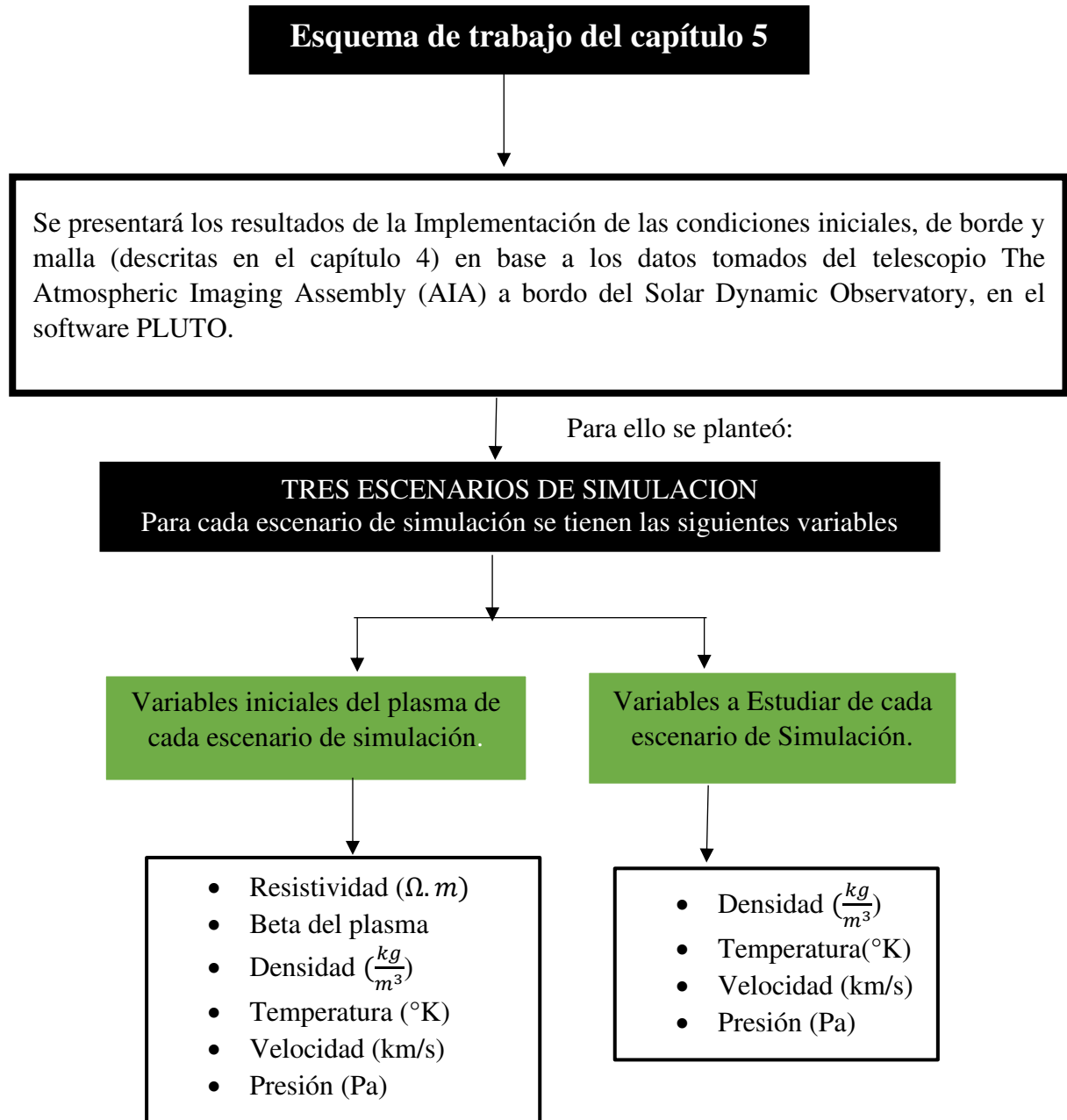


Figura 5.1. Esquema de trabajo en PLUTO. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta un esquema reducido de la descripción de los datos observacionales obtenidos en el capítulo 3, para presentar los resultados de la implementación de modelo numérico del capítulo 4:

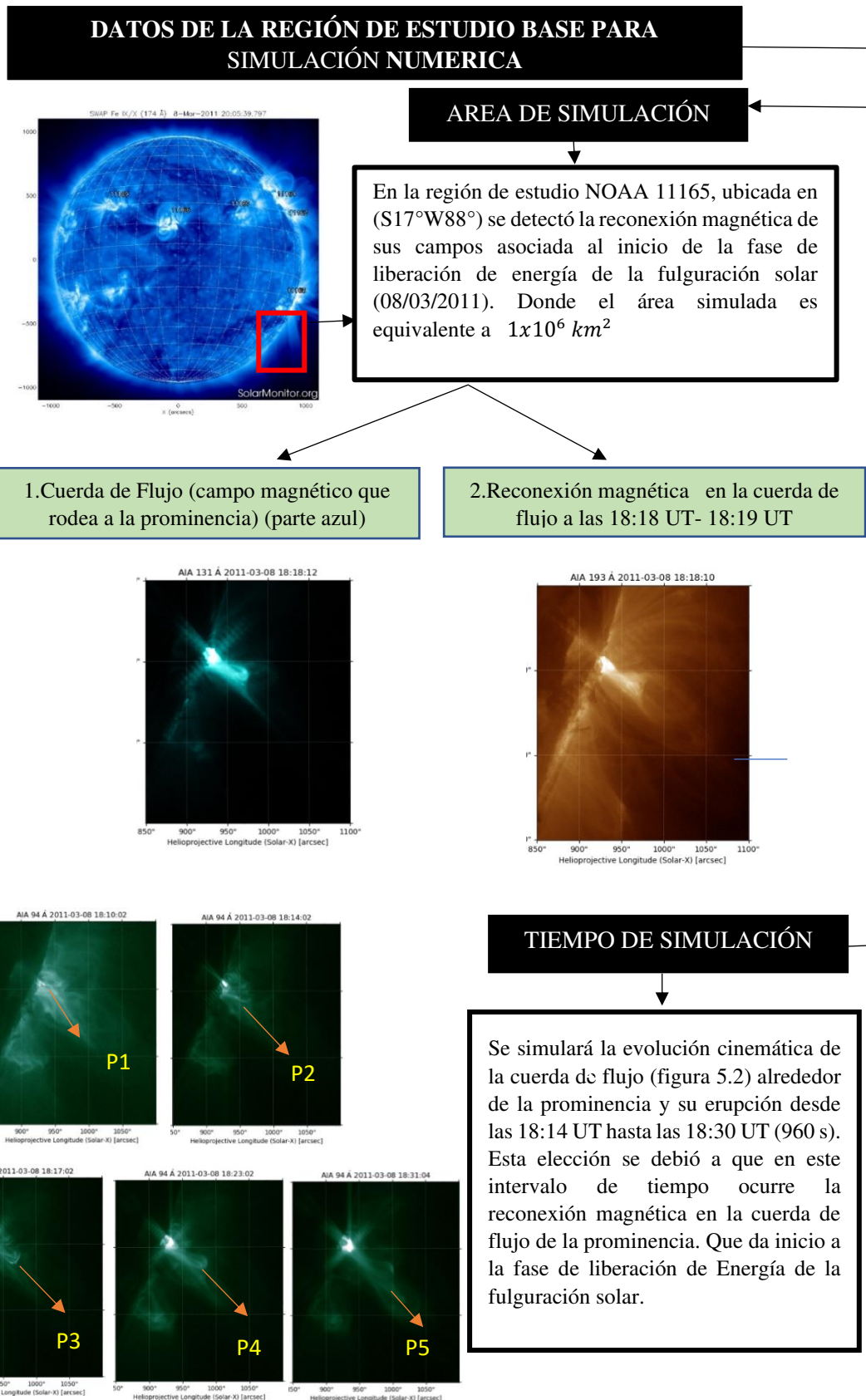


Figura 5.2. Esquema de Evolución de la cuerda de flujo.  
 Los puntos: p1, p2, p3, p4 y p5, representa la posición de la cuerda en el tiempo.  
 Fuente: Elaboración Propia.

## 5.1 Finalidad de la Simulación Numérica

Realizar la simulación de la cuerda de flujo y su reconexión magnética, identificada con el telescopio **The Atmospheric Imaging Assembly (AIA)** a bordo del **Solar Dynamic Observatory (SDO)**, usando la configuración magnética inicial de (Chen y Shibata, 2000) y las condiciones de borde e iniciales planteadas en el capítulo 4 para los tres escenarios de simulación. En el intervalo de tiempo observacional,  $T=18:14 \text{ UT} - 18:30 \text{ UT}$ , que se representa en la simulación  $t=0 \text{ s}$  hasta  $t=960 \text{ s}$ .

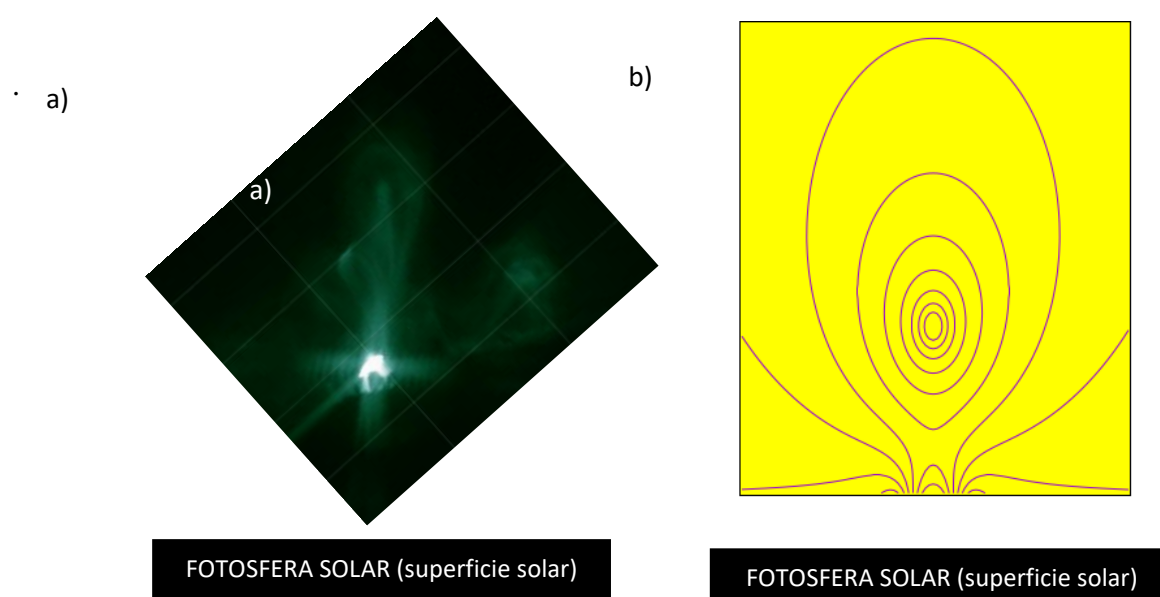


Figura 5.3. Cuerdas de flujo.

a) Cuerda de flujo simulada donde la superficie es la fotosfera solar y el área superior es la atmósfera solar. Fuente: AIA/SDO. b) Cuerda de flujo Captada por SDO /AIA en la región NOAA 11165 el 8 de marzo del 2011 a las 18:30 UT. Fuente: Elaboración propia.

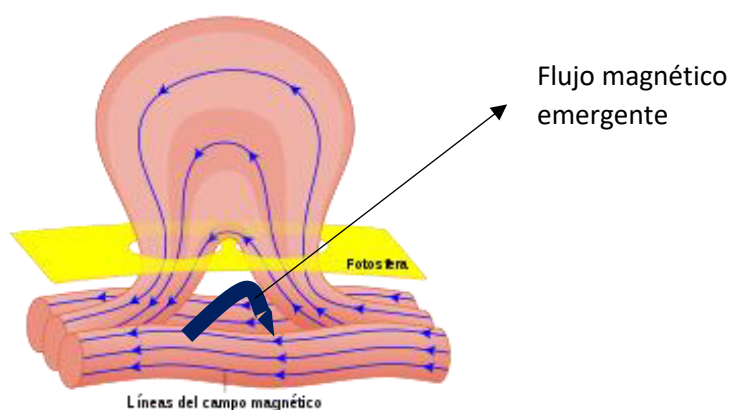


Figura 5.4. Cuerda de flujo 3D

Representación del flujo (azul) que emerge de la superficie solar hacia la corona y genera que la cuerda de flujo se desestabilice. Fuente: Adaptado de wikiwand ,2019.



## 5.2 Primer Escenario de Simulación

En esta sección se resumirá el modelo numérico mostrado en el capítulo 4 para el primer escenario, cabe resaltar que las condiciones iniciales de campo magnético y condiciones iniciales generales son las mismas para los tres escenarios, con excepción de la presión y resistividad por las razones expuestas en el capítulo 4, sección 4.2.8:

**Tiempo:** Se eligió el tiempo de simulación como 960 s, que representa la evolución de la cuerda de flujo observada en la atmosfera solar con The Atmospheric Imaging Assembly(AIA) a bordo del Solar Dynamics Observatory (SDO), desde las 18:14 hasta las 18:30 UT. La cuerda de flujo representa el campo magnético de la prominencia asociada a la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011.

**Tamaño de Malla:** Considerando un tamaño de Malla  $-8 < x < 8$  y  $0 < y < 12.5$ , que esta discretizado como (100x100) puntos de malla que está distribuida de manera uniforme en la dirección **X** y dirección **Y**. Considerando que 1 cm de la malla computacional representa 5000 km en los datos observacionales. En la figura 5.5.a, el eje Y representa la atmosfera solar por encima de la fotosfera solar y el eje X la fotosfera solar. Las líneas de color negro el campo magnético inicial.

**Configuración Magnética Inicial:** se usa la configuración magnética (figura 5.5 a), planteada en el capítulo 4 basada en el modelo (Chen y Shibata, 2000).Donde  $\Psi_b$  la corriente de fondo campo cuadrupolar,  $\Psi_i$  la campo magnético de imagen de corriente y  $\Psi_l$  es el campo magnético de línea de corriente.En el campo magnético de fondo el coeficiente C, se determinó por ensayo y error para lograr que el sistema se mantenga estable y en  $t=0$  s estático  $(v_x, v_y)=(0,0)$ , se encontró que  $C=0.22$ .

$$\Psi_b = c \ln \left( \frac{[(x+0.3)^2 + (y+0.3)^2][(x-0.3)^2 + (y+0.3)^2]}{[(x+1.5)^2 + (y+0.3)^2][(x-1.5)^2 + (y+0.3)^2]} \right) \quad (63)$$

$$\Psi_i = -\frac{r_o}{2} \ln [x^2 + (y + h)^2] \quad (64)$$

$$\Psi_l = \frac{r^2}{2*r_0} \quad r \leq r_0 \quad (65)$$

$$\Psi_l = \frac{r_0}{2} - r_0 \ln(r_0) + r_0 \ln(r) \quad r > r_0$$

$$r = [x^2 + (y - h)^2]^{1/2} \quad (66)$$

$$\Psi_e = 0.11 * \cos\left(\frac{\pi x}{0.6}\right) \quad (67)$$

$$\Psi = \Psi_b + \Psi_i + \Psi_l + \Psi_e \quad (68)$$

Se considero un campo magnético emergente de este tipo  $0.11 * \cos\left(\frac{\pi x}{0.6}\right)$ , debido a que este se adecua a las escalas usadas por el modelo, la función que emerge de la base de la malla (fotosfera), representa un flujo que se suma a la configuración magnética inicial (68) afectando su evolución. Además, se considera que el parámetro  $h=4.5$  y  $r_0 = 0.5$  en las ecuaciones 63 a 68 que se adecua a las condiciones de longitud equivalente elegida.

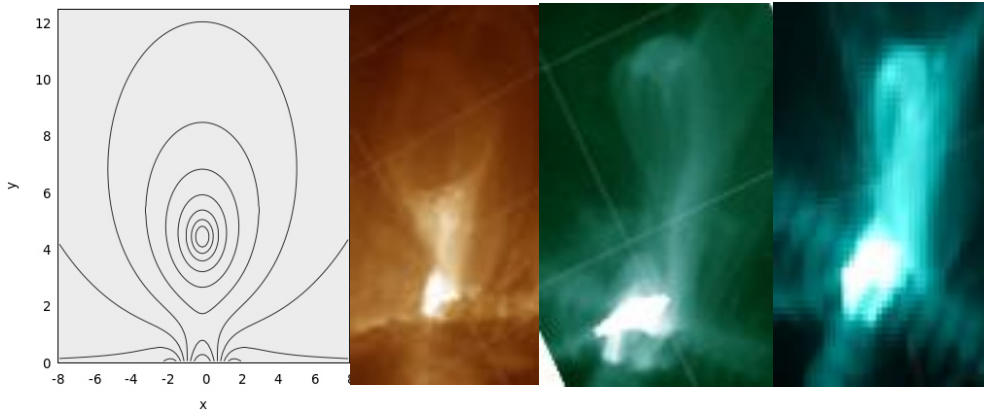


Figura 5.5. Cuerdas de flujo simulada y observadas.

a) Configuración magnética inicial escenario1 b) Cuerda de flujo observada(real).

Fuente: Elaboración propia.

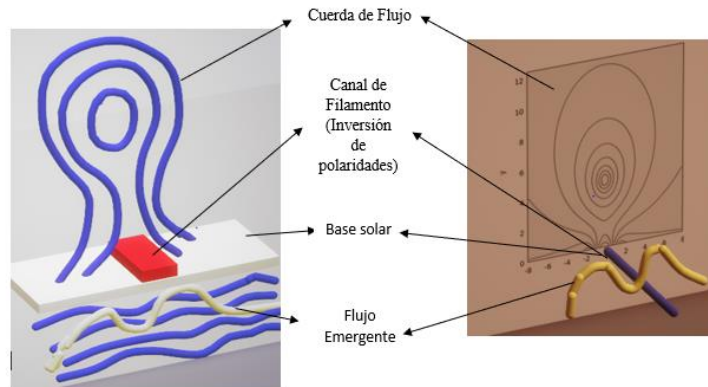


Figura 5.6. Cuerda de flujo 3D.

a) Representación en 3D de la cuerda de flujo sobre la fotosfera y en el medio de la línea de inversión de corrientes (canal de filamento) b) Representación 2D de la cuerda de flujo, flujo emergente y canal de filamento. Fuente: Elaboración propia.

## Condiciones Iniciales y de frontera

Las condiciones de frontera son las siguientes:

$$\frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial \vec{v}}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial B}{\partial \hat{n}} = 0 \quad (69)$$

Valor inicial de las variables a usar son:

Tabla 5.1. valores de parámetros iniciales.

Parámetro inicial	Valor
Densidad	$1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$
Temperatura	$10^6 K$
Velocidad	$500 \frac{km}{s}$
Resistividad inicial	0.02
Campo emergente	$(0.11 * \cos(\frac{\pi x}{0.5}))$
Beta del Plasma	0.01
Presión	0.5 Pa

*Fuente: Elaboración propia.*

### Condición inicial de temperatura, densidad y Presión

Se asume una temperatura un informe  $T = T_o$ , la distribución de densidad inicial es:

$$\rho/\rho_0 = \begin{cases} 1 + \frac{2}{\beta} (1 - \frac{r^2}{r_o^2}), & r \leq r_o; \\ 1 & r > r_o; \end{cases} \quad (70)$$

Donde  $\beta$  es la relación del gas con el campo magnético y la presión inicial es  $P = P_o$

### 5.2.1 Resultados de la evolución global de la cuerda de flujo simulada

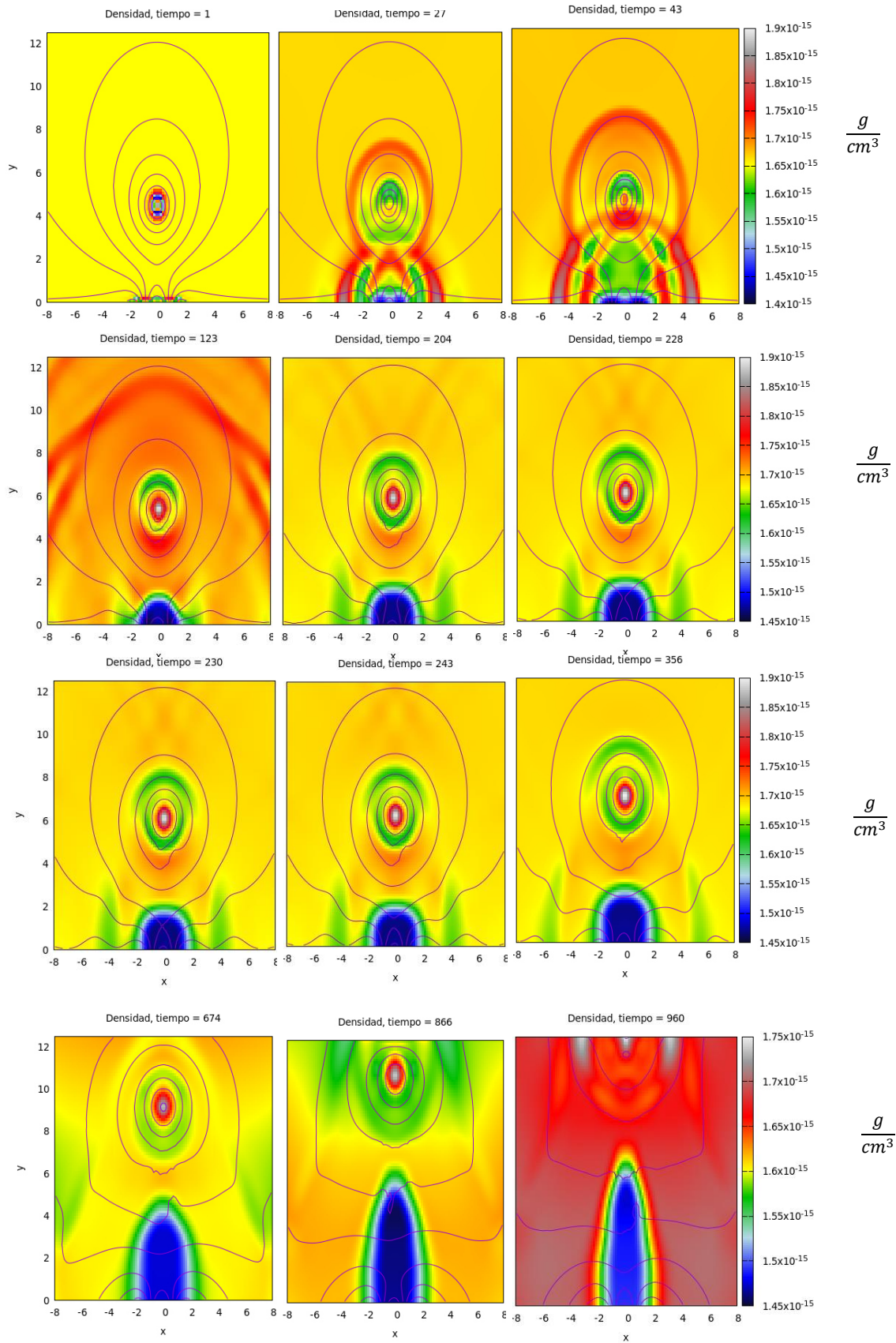


Figura 5.7. Evolución de Densidad en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

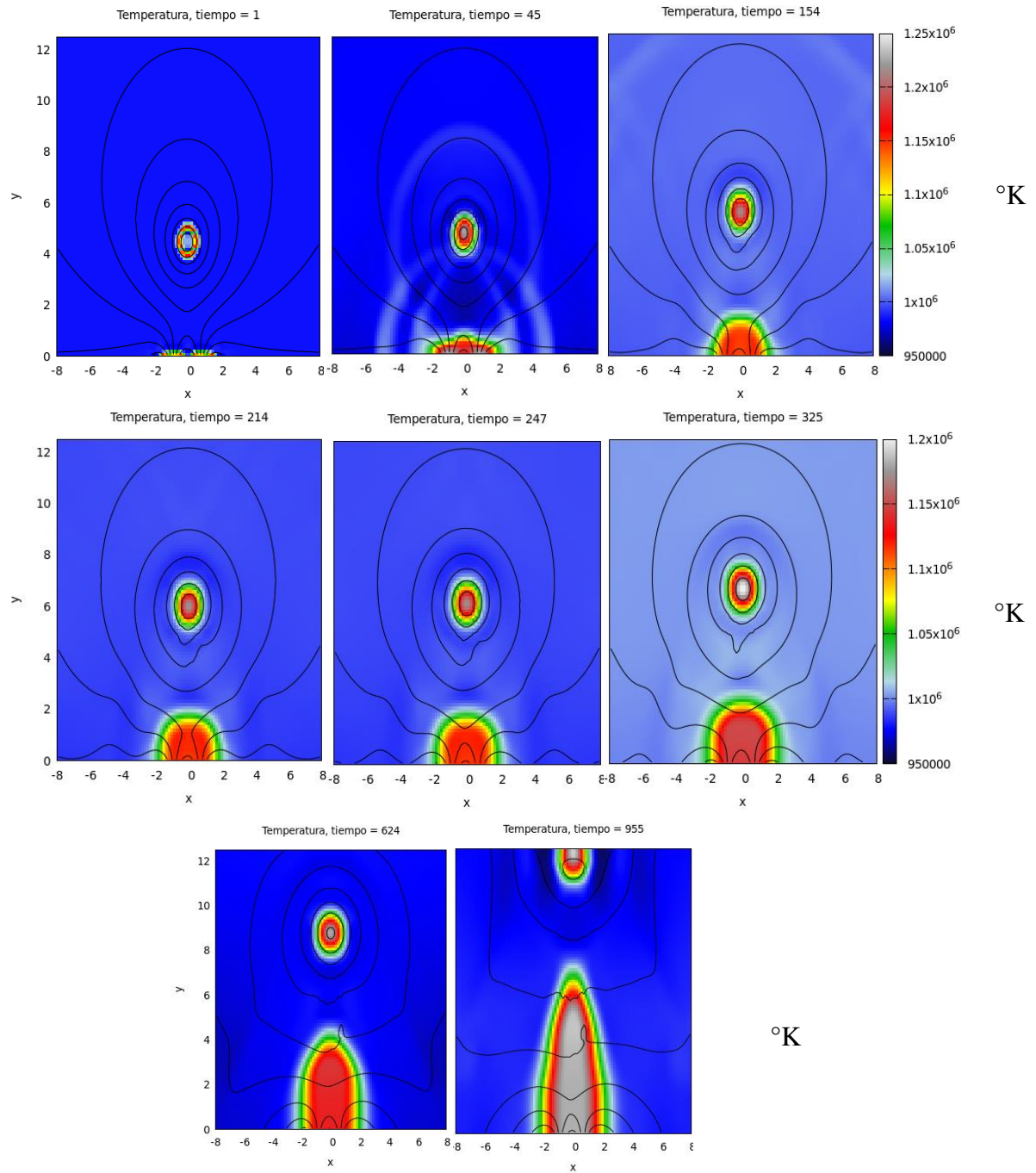


Figura 5.8. Evolución de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La secuencia imágenes de las figuras (5.7 y 5.8) representan la evolución temporal de densidad y temperatura (degradación de colores) de la cuerda de flujo simulada en la atmósfera solar y líneas magnéticas (líneas continuas negras).

El sistema de ecuaciones Magnetohidrodinámicas resistivas se resolvieron numéricamente usando el paquete de simulación PLUTO, con las condiciones iniciales del plasma descritas en la sección anterior y las ecuaciones gobernantes (Sección 4.2.2) donde un campo magnético emerge dentro del canal de filamento o línea de inversión de polaridades (Figura 5.10). El flujo es compresible y la curvatura de la superficie solar no es considerada es decir la superficie es plana.

En la figura 5.9, la densidad es superior en el centro de la cuerda de flujo, debido a que la distribución de densidad (70), de las observaciones han registrado una mayor densidad en las prominencias que el entorno circundante atmosférico solar.

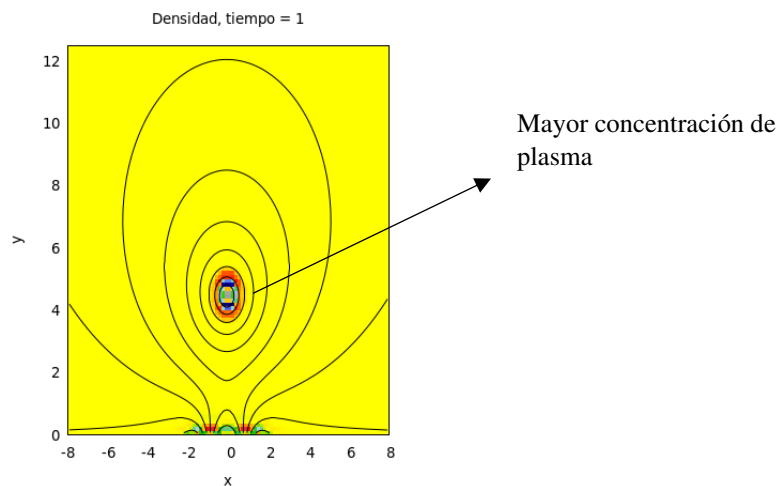


Figura 5.9. Cuerda de flujo en  $t=1$ . Fuente: Elaboración propia.

Sobre la prominencia actúan tres fuerzas: La gravedad, la tensión magnética y la presión magnética (Magara, 2011). Pero debido a que en el modelo no se considera la fuerza de la gravedad solo se tomara en cuenta la presencia la gradiente de presión magnética y la tensión magnética.

En la figura 5.7 y 5.8, entre  $0 \leq t(s) \leq 130$ , el flujo emergente interactúa con la cuerda de flujo dentro el canal de filamento (figura 5.10.a) debajo de la fotosfera, a pesar de esto la cuerda de flujo se mantiene estable debido a que en un principio la tensión magnética general (en



dirección del eje Y -) y la gradiente de presión (en dirección del eje Y+) se encuentra en equilibrio (Figura 5.10.b).

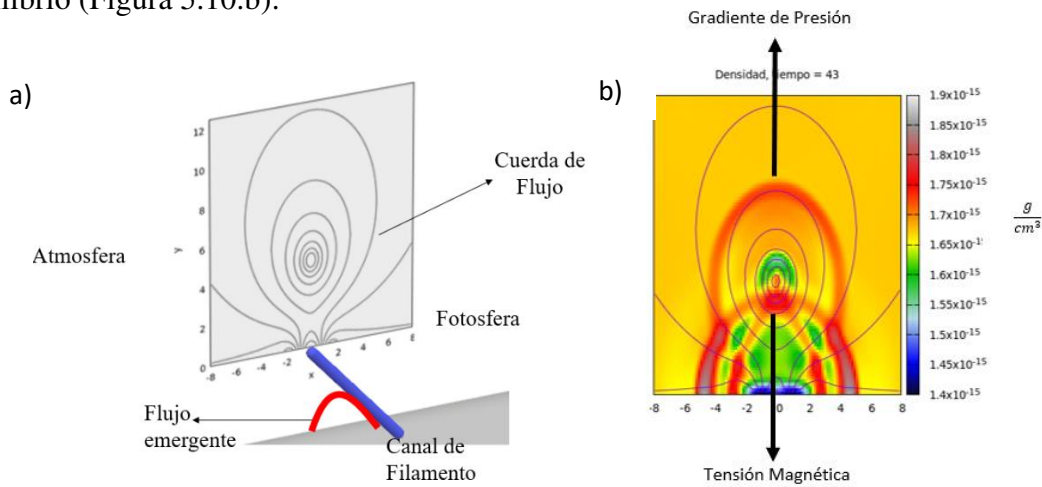


Figura 5.10. Cuerda de flujo en estado estable. Fuente: Elaboración propia.

**Entre  $130 \leq t(s) \leq 230$**  empieza a acelerar la velocidad con la que las líneas de campo magnético se acercan en el punto X (0,1.7). Producto de la interacción entre el flujo emergente y la cuerda de flujo en el anterior intervalo. Esto produce que la presión magnética general disminuya abruptamente con una pendiente pronunciada, a la vez la beta coronal es  $\beta = 0.01$  es muy bajo y la presión magnética supera a la presión del gas, es decir el plasma se mueve debido a los campos magnéticos. **En el  $t=230$  s** la morfología magnética inicial cambia y la cuerda de flujo se corta y reconecta elevándose, ocurriendo la reconexión magnética, ya que la resistividad logra vencer la fuerza de tensión contraria de las líneas de campo magnético, generando flujo de salida de plasma en dirección Y, siendo la densidad de corriente eléctrica mayor que la densidad de corriente crítica.

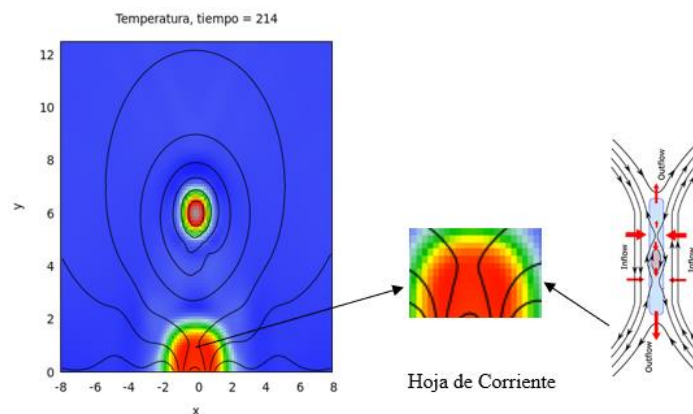


Figura 5.11. Hoja de corriente en la cuerda de flujo en  $t=214$  s. Fuente: Elaboración propia.

Entre  $230 \leq t(s) \leq 960$ , la presión magnética se mantiene disminuyendo con el aumento de la altura(h) de la cuerda de flujo, seguidamente la cuerda de flujo sigue elevándose hasta 960 s de simulación.

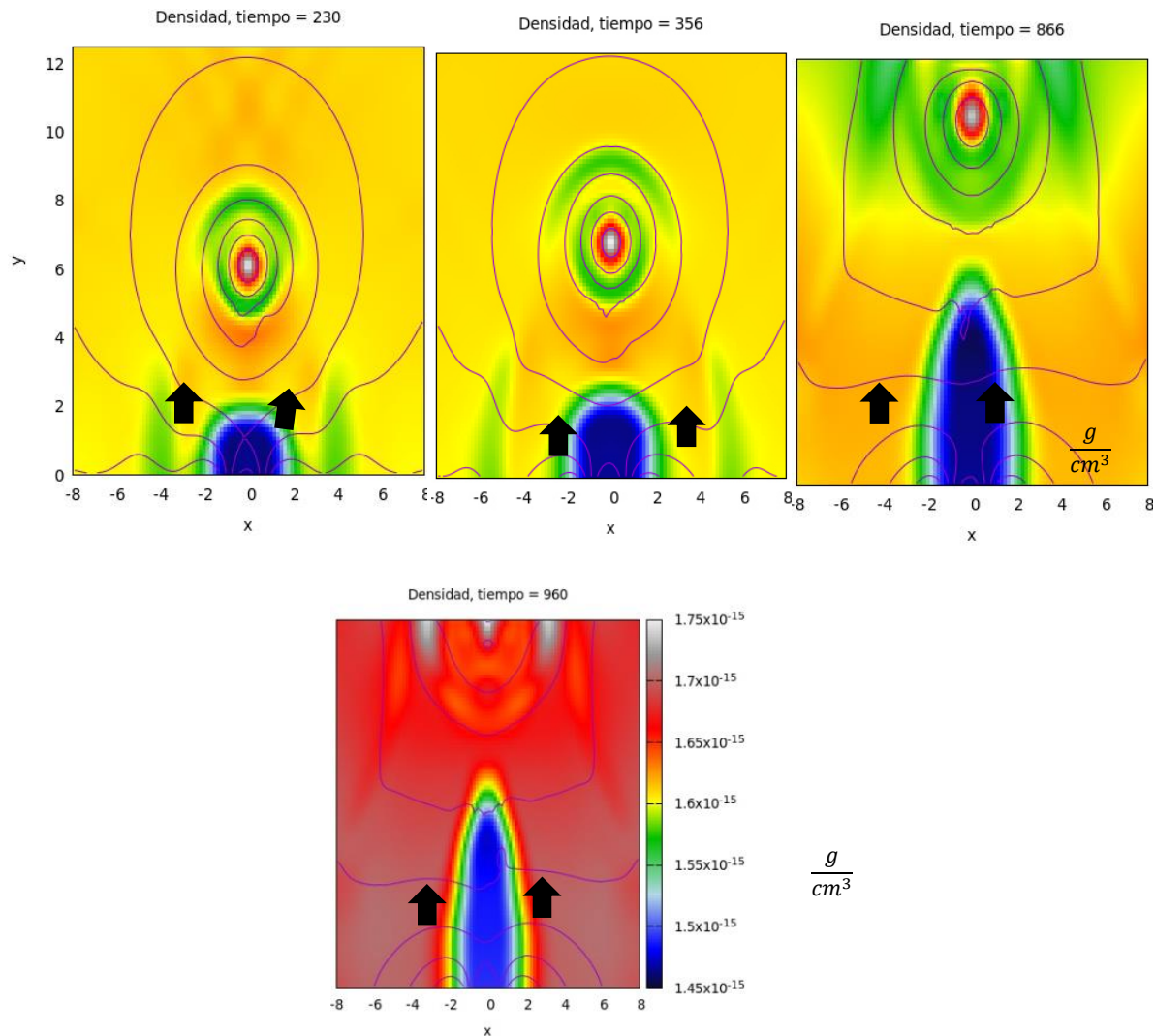


Figura 5.12. Evolución de la cuerda de flujo desde  $t=230$ s hasta  $t=960$  s.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior mencionado podemos decir, que la reconexión magnética en el escenario 1, cambia la configuración del campo magnético (topología de línea de campo), destruyendo el equilibrio de fuerzas para impulsar una evolución global de la estructura (shibata,2011), la reconexión magnética va acompañada de un aumento de la energía cinética, energía térmica que se observa en la curva de GOES (capítulo 3, figura 3.10) además de la producción de flujo partículas.



Como se ha descrito líneas arriba la evolución global del sistema se puede dividir en tres etapas descritas en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2. Etapas

<i><b>Etapas</b></i>	<i><b>Característica</b></i>
<i>Etapa Cuasi estática</i>	Entre $0 \leq t(s) \leq 130$ , la cuerda de flujo se mantiene estable.
<i>Etapa de Reconexión Magnética</i>	Entre $130 \leq t(s) \leq 230$ , se forma la hoja de corriente y se produce la reconexión Magnética.
<i>Etapa Post-Reconexión Magnética</i>	Entre $230 \leq t(s) \leq 960$ , la cuerda de flujo empieza a elevarse.

. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2 Evolución de hoja de Corriente

Como se describió anteriormente la resistividad, tiene un papel relevante dentro de la reconexión magnética, puesto que representa la fricción entre iones y electrones, lo que puede interpretarse como la fuerza que se opone al movimiento de la corriente eléctrica. Esta fuerza permite la disipación de la electricidad dentro de la hoja de corriente eléctrica que luego lleva a la reconexión magnética. La resistividad es un término importante dentro de las ecuaciones MHD, ya que se agrega en la ecuación de inducción de campo magnético, la ecuación de energía y el campo eléctrico (ley de ohm). La resistividad en este caso es considerada uniforme en  $\eta = 0.02 \Omega.m$ , la densidad de corriente eléctrica crítica es  $j_c = 0.5 \frac{A}{m^2}$  y la función de resistividad se expresa como:

$$\eta = \begin{cases} \eta_o \left( 1, \left| \frac{j_z}{j_c} \right| - 1 \right), & |j_z| \geq j_c ; \\ 0 & |j_z| < j_c ; \end{cases} \quad (71)$$

La configuración magnética inicial planteada, utiliza el modelo de reconexión magnética rápida, que ocurre dentro de la hoja de corriente cuando la densidad de corriente eléctrica, supera la densidad de corriente crítica activando la resistividad y aumentando la disipación de energía lo cual provoca cambios en el campo magnético a través de la reconexión magnética.

Esta resistividad se introduce en el modelo porque reproduce con mejor exactitud el tiempo de reconexión observado, de ahí procede el nombre de “reconexión rápida”. Como se observa en la ecuación (71) cuando la densidad crítica de corriente eléctrica no es superada por la densidad de corriente crítica, la resistividad es cero por lo que las ecuaciones MHD ya no consideran el tensor de resistividad ni sus efectos sobre el sistema por lo tanto el MHD es ideal. Por esta razón **desde el t=0 s hasta t=130 s**, en la cuerda de flujo no ocurre la reconexión magnética.

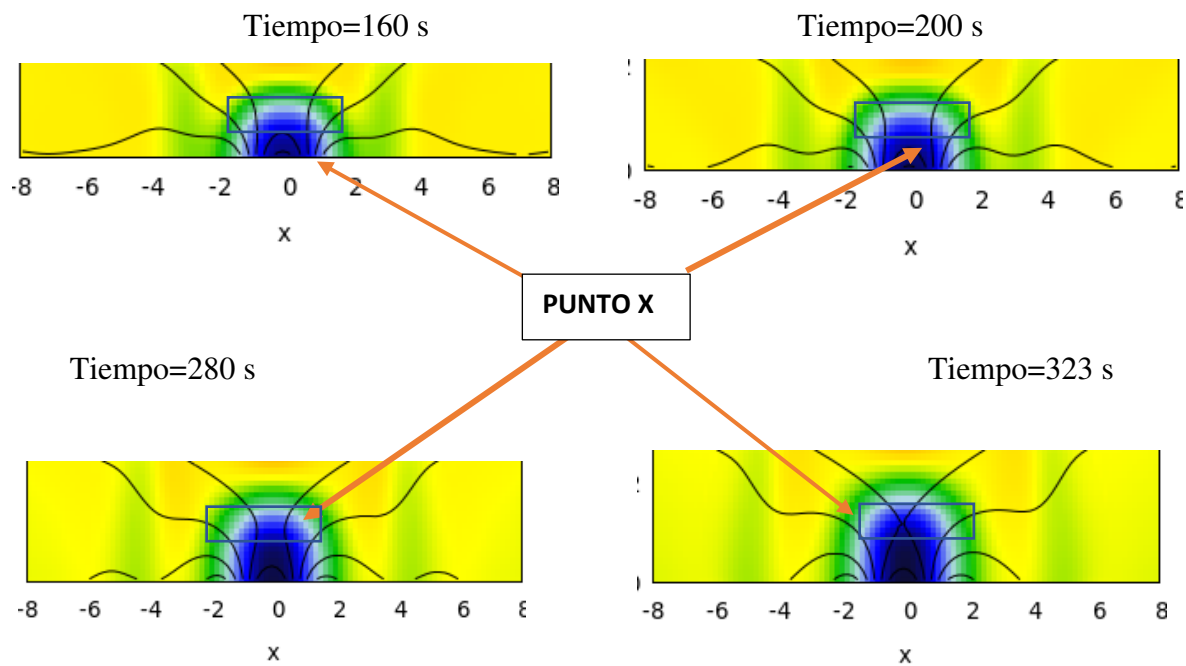


Figura 5.13. Secuencia de Formación de hoja de Corriente. Fuente: Elaboración propia.

**Pero, desde el t=130 s hasta t=230 s** se forma la hoja de corriente eléctrica cuando las líneas de campos magnético paralelo alrededor del punto X, empiezan a juntarse empujadas por la gradiente de presión, el cual hace que el ancho de la hoja de corriente empiece a disminuir de 2cm en t=130 s a ser  $< 0.5$  cm en t=230 s, generando que la cuerda de flujo pierda su estado de equilibrio y salga de la fase cuasi estática. La hoja de corriente se forma, porque debajo de la fotosfera el flujo magnético emergente  $0.11 * \cos\left(\frac{\pi x}{0.6}\right)$  interactúa con el campo magnético inicial en t=0 s generando una cancelación de flujo magnético y una disminución de presión gradual. Durante este intervalo de tiempo, la resistividad empieza afectar el sistema es

decir la densidad de corriente eléctrica supera a la densidad de corriente crítica disipando la corriente eléctrica y al mismo tiempo, la tensión magnética perpendicular a la hoja de corriente es mayor produciéndose la reconexión magnética en el punto X en  $t=230$  s, la hoja de corriente se rompe y las líneas de campo magnético se vuelven a reconectar en este proceso la energía magnética se convierte en cinética y térmica, iniciándose la fase de liberación de energía de la fulguración solar.

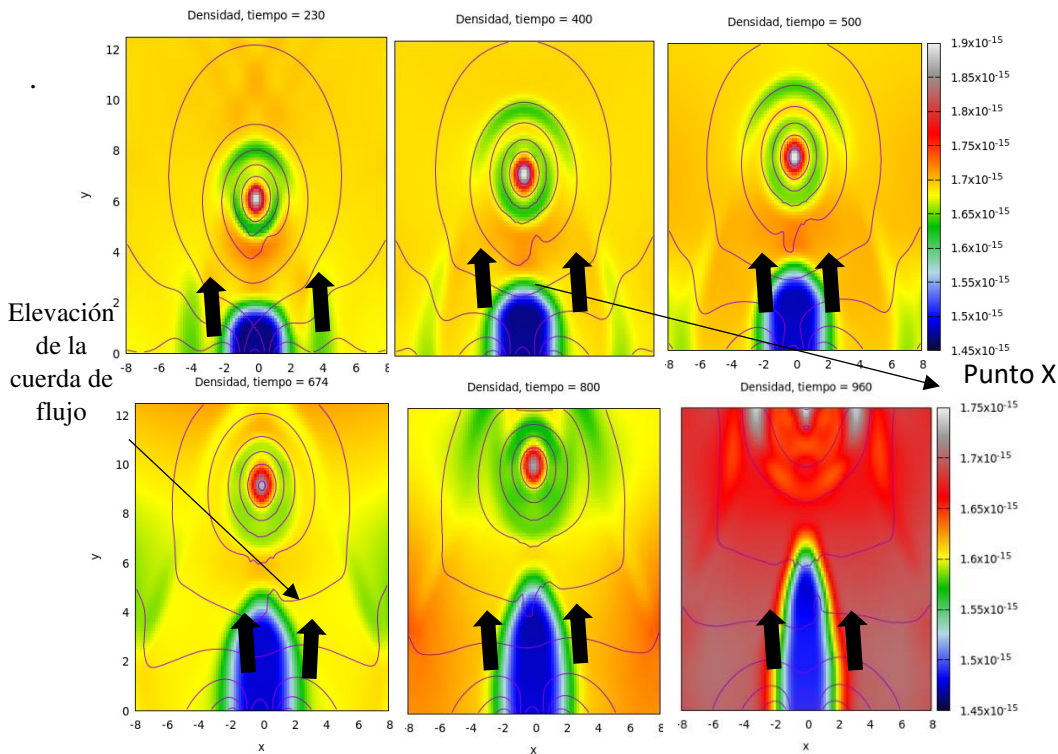


Figura 5.14. Evolución de la cuerda de Flujo desde  $t=230$  s hasta  $t=960$  s. Fuente: Elaboración propia.

Desde  $T=230$  s hasta  $t=960$  s, se producen las salidas de reconexión o las también llamadas salidas de flujo plasmático que aceleran partículas generando el movimiento en el plasma, estas salidas empujan la cuerda de flujo hacia arriba (Figura 5.14) generando un cambio de morfología global y la inestabilidad de la cuerda de flujo, cuando la gradiente de presión magnética global vence a la tensión magnética. A pesar que la energía liberada ocurre a pequeña escala el efecto de esta reconexión magnética sobre el sistema es notorio.

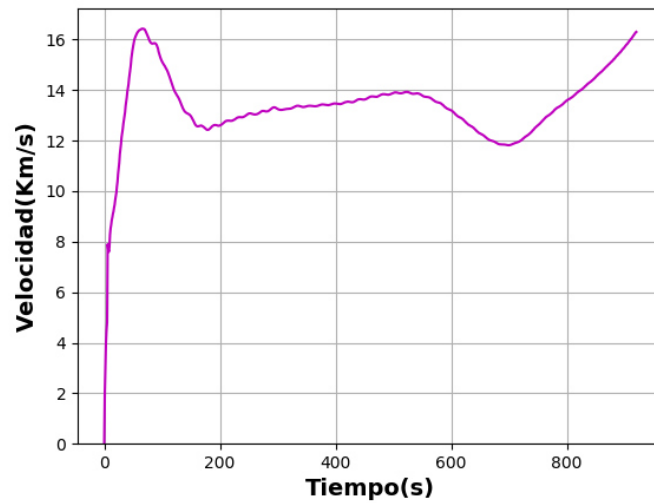


Figura 5.15. Velocidades en el punto X (0,1.7). Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 5.15 la velocidad en el punto X (0,1.7), donde ocurre la reconexión, presenta una subida lenta partiendo en el  $t=0$  s hasta  $t=100$  s alcanzando una velocidad máxima de 16 km/s. Desde  $100 \leq t(s) \leq 190$  hay un descenso en la velocidad a 12 km/s para luego registrar, entre  $t=190$  s hasta  $t=410$  s una aceleración, con un posterior nuevo descenso en  $t=670$  s, desde este punto se presenta una aceleración rápida de la velocidad hasta en  $t=960$  s alcanzando el pico máximo de 16.3 km/s.

### 5.2.3 Evolución de Velocidad de la Cuerda de Flujo

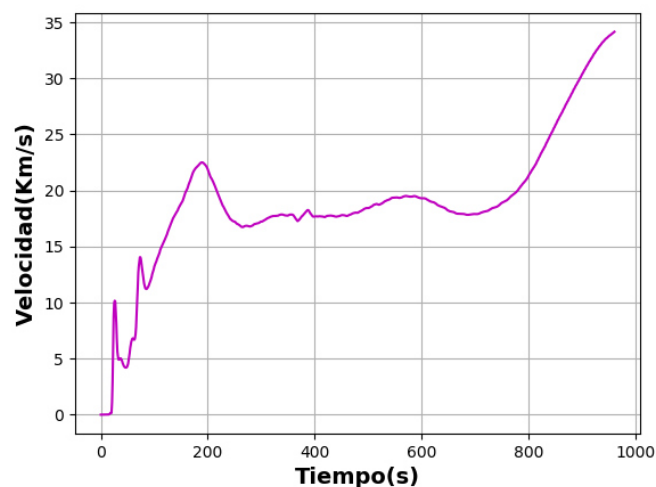


Figura 5.16. Gráfico de distribuciones de Velocidades en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Observando la figura 5.16, entre  $0 \leq t(s) \leq 60$ , la velocidad inicial oscila registrando un valor máximo de 10 km/s hasta decrece a 5 km/s, seguidamente entre  $60 \leq t(s) \leq 100$ , repite el mismo comportamiento, a continuación en  $100 \leq t(s) \leq 190$  se identifica una aceleración de la cuerda de flujo con una  $v_{max} = 22$  km/s. Posteriormente en  $200 \leq t(s) \leq 230$  la velocidad desacelera hasta 16 km/s, partir de este punto entre  $231 \leq t(s) \leq 790$  la velocidad de la cuerda presenta una velocidad promedio de 18.5 km/s, entre  $600 \leq t(s) < 800$  la velocidad fluctúa entre 16 km/s y 20 km/s y finalmente en el intervalo de  $800 \leq t(s) \leq 960$  la velocidad acelera obteniendo un  $v_{max} = 34.14$  km/s, esta última aceleración permite la expulsión de la cuerda de flujo fuera de la atmosfera.

#### 5.2.4 Evolución de Temperatura Global

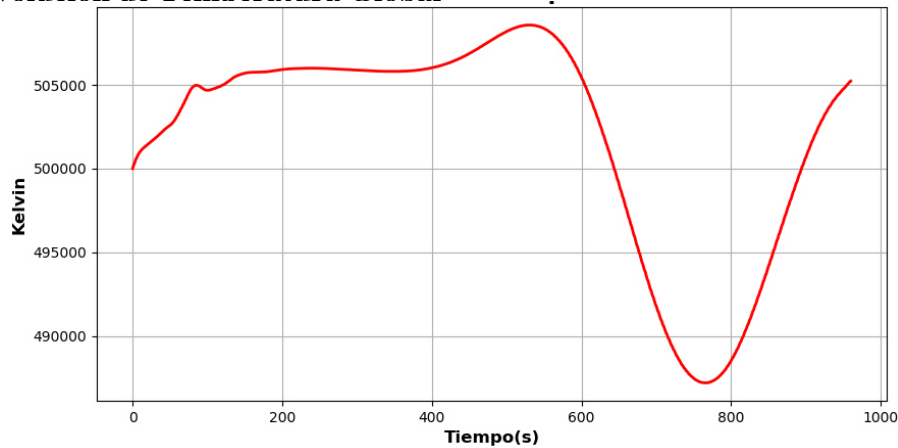


Figura 5.17. Evolución temporal de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la temperatura promedio de la cuerda de flujo. Desde  $0 \leq t(s) \leq 200$  la curva de temperatura plasma incrementa de 500 000 °K a 505 919.05 °K, posteriormente en el intervalo  $200 \leq t(s) \leq 400$  se registra un valor promedio de 505883.65 °K y en  $400 \leq t(s) \leq 500$  hay un máximo de 508 194.77 °K.

En los resultados se observan tres fases en la evolución de temperatura, en el intervalo de  $0 \leq t(s) < 500$ , la temperatura aumento constantemente esto se debe a que ocurre la reconexión magnética, calentando el plasma circundante a la región de reconexión durante la fase de

liberación de energía de una fulguración solar. Posteriormente en el intervalo de tiempo de  $500 < t(s) < 780$ , se observa una rápida disminución de temperatura, finalmente en  $780 < t(s) < 960$  un aumento de temperatura, durante esta etapa la cuerda de flujo aumenta su tamaño y se aleja con mayor rapidez de la superficie.

Tabla 5.3.Evolución de Temperatura.

Tiempo	Temperatura(°K)
60	$5.0318 \times 10^5$
80	$5.0486 \times 10^5$
90	$5.049 \times 10^5$
110	$5.0479 \times 10^5$
115	$5.0488 \times 10^5$
118	$5.0494 \times 10^5$
120	$5.0498 \times 10^5$
180	$5.0579 \times 10^5$
190	$5.0586 \times 10^5$
210	$5.0596 \times 10^5$
230	$5.0599 \times 10^5$
240	$5.06 \times 10^5$
480	$5.0768 \times 10^5$
490	$5.0795 \times 10^5$
660	$4.9761 \times 10^5$
840	$4.9278 \times 10^5$
900	$5.0066 \times 10^5$
960	$5.0523 \times 10^5$

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5.2.5 Evolución de densidad

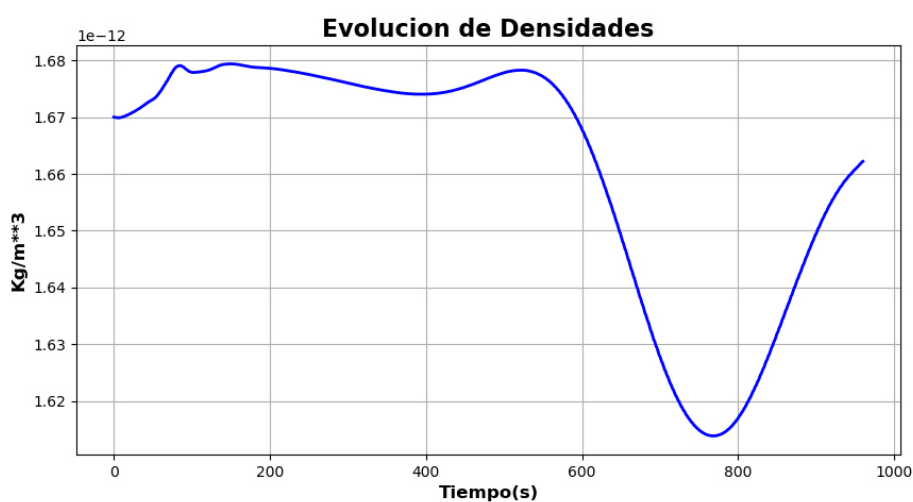


Figura 5.18.Evolución de densidad. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la densidad promedio de la cuerda de flujo siguiendo la condición inicial descrita en capítulo 4 (sección 4.2.3.2). Desde  $t=0$  s la curva de la densidad del plasma registra un valor de  $1.67786 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  mostrando una pendiente positiva, que muestra el aumento del valor inicial hasta  $1.6787 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  en  $t=180$  s. En el intervalo de  $190 \leq t(s) \leq 400$  la densidad pasa de  $1.67867 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  a  $1.674 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , luego en  $t=510$  s se registra un valor de  $1.6781 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ .

En resumen, en el intervalo  $0 \leq t(s) \leq 510$  no sufre variaciones significativas lo mismo se puede observar en la secuencia de imágenes de densidades, posteriormente entre  $t=510$  s hasta  $t=720$  s se observa una disminución considerable hasta  $1.62 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , para luego aumentar su valor a  $1.66 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  en  $t=960$ s. Estas tres fases marcadamente diferenciadas en el comportamiento de la densidad: un aumento lento, un descenso y un aumento acelerado, van de acuerdo al comportamiento general de la presión y la velocidad de la cuerda de flujo.

Tabla 5.4.Evolución de densidad.

Tiempo(s)	Densidad( $\frac{kg}{m^3}$ )
60	$1.67 \times 10^{-12}$
80	$1.6691431446098 \times 10^{-12}$
90	$1.66993161239780 \times 10^{-12}$
110	$1.668716236598000 \times 10^{-12}$
115	$1.6694901861408 \times 10^{-12}$
118	$1.671537207645400 \times 10^{-12}$
120	$1.671881339769199 \times 10^{-12}$
180	$1.671924199150200 \times 10^{-12}$
190	$1.6711511066848 \times 10^{-12}$
210	$1.670429322063600 \times 10^{-12}$
230	$1.6697915839332 \times 10^{-12}$
240	$1.6695512036656 \times 10^{-12}$
480	$1.6681446327388 \times 10^{-12}$
490	$1.67178214400700 \times 10^{-12}$
660	$1.662179155765799 \times 10^{-12}$
840	$1.64215203213379 \times 10^{-12}$
900	$1.6468246886602 \times 10^{-12}$
960	$1.662593357415599 \times 10^{-12}$

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.6 Evolución de Presión de gas

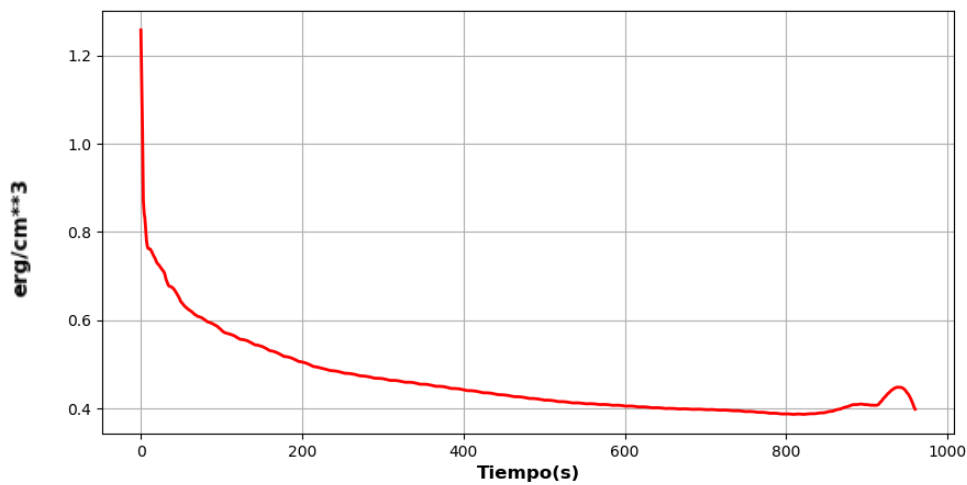


Figura 5.19. Evolución de presión. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la presión promedio de la cuerda de flujo, desde  $t=0$  s la presión decae drásticamente de 1.2 Pa a 0.5 Pa en  $t=200$  s, luego hasta  $t=850$  s la presión sigue decayendo, pero la variación de presión  $\Delta p$  en el tiempo es 0.1 Pa, mucho menor en comparación a la primera etapa ( $0 \leq t(s) \leq 200$ ) en donde  $\Delta p = 0.7$  Pa, finalmente a partir de  $t=850$  s a  $t=960$  s se registra un aumento de presión poco considerable.

Estas dos fases son marcadamente diferenciadas, registrando primero una acelerada disminución y luego una lenta disminución de presión, son producto de la presencia del campo emergente y la cancelación de la misma con el campo magnético inicial, la presión disminuye con respecto a la altura  $\frac{1}{y^3}$ , generando que la gradiente de presión general vaya hacia el punto X (0,1.7) formándose la hoja de corriente eléctrica.



Tabla 5.5.Evolución de Presión de gas.

Tiempo(s)	Presión (Pa)
60	0.6236
80	0.6002
90	0.5916
110	0.5692
115	0.5659
118	0.5627
120	0.5606
180	0.5181
190	0.5123
210	0.4992
230	0.4891
240	0.4857
480	0.4241
490	0.4228
660	0.4008
840	0.39
900	0.4095
960	0.3991

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5.2.7 Evolución de Presión Magnética

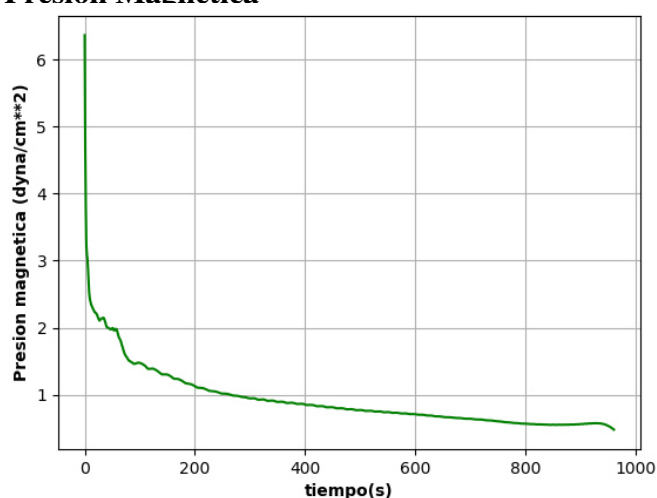


Figura 5.20.Presión Magnética. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la presión magnética promedio de la cuerda de flujo. En el intervalo de  $0 \leq t(s) \leq 200$  la presión decae drásticamente de  $6.3622 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  a  $1.1279 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ . Donde  $\Delta P_{mag} = 5.234 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  registrándose una rápida disminución de la presión magnética en este intervalo, como consecuencia de la interacción del campo magnético emergente con la cuerda de flujo en  $t=0$  s. Entre  $200 \leq t(s) \leq 600$  la presión magnética

decae de  $1.1279 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  a  $0.7097 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ , en este intervalo la disminución de presión es menos drástica (se mantiene estable), ocurriendo durante este periodo la reconexión magnética en  $t=230$  s y la etapa de post reconexión magnética. Finalmente, en  $t=960$  s la presión magnética alcanza el valor de  $0.418 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ .

### 5.3 Segundo escenario de Simulación

En esta sección se resumirá el modelo numérico mostrado en el capítulo 4 para el escenario 2:

**Tiempo:** 960 s (18:14 UT -18:30 UT). Evolución temporal de la cuerda de flujo asociada a la fulguración solar M4.4 08/03/2011. Observada con AIA/SDO.

**Tamaño de Malla:** Entre  $-8 < x < 8$  y  $0 < y < 12.5$ , dividida en (100x100) puntos de malla dividida uniformemente en X(fotosfera) y Y (atmosfera solar). Donde un 1 cm de la malla computacional equivale a 5000 km.

**Configuración Magnética Inicial:** Donde  $\Psi_b$  es la corriente de fondo de campo cuadrupolar, donde  $C=0.22$ ,  $\Psi_i$  el campo magnético de imagen de corriente y  $\Psi_l$  es el campo magnético de línea de corriente. Además  $\Psi_e = 0.11 * \cos(\frac{\pi x}{0.6})$ , ubicado en  $(-0.3 < x < 0.3)$ , para finalmente ser  $\Psi = \Psi_b + \Psi_i + \Psi_l + \Psi_e$ . (Figura 5.21)

$$\Psi_b = c \ln \left( \frac{[(x+0.3)^2 + (y+0.3)^2][(x-0.3)^2 + (y+0.3)^2]}{[(x+1.5)^2 + (y+0.3)^2][(x-1.5)^2 + (y+0.3)^2]} \right) \quad (72)$$

$$\Psi_i = -\frac{r_o}{2} \ln [x^2 + (y+h)^2] \quad (73)$$

$$\Psi_l = \frac{r^2}{2*r_o} \quad r \leq r_o \quad (74)$$

$$\Psi_l = \frac{r_o}{2} - r_o \ln(r_o) + r_o \ln(r) \quad r > r_o$$

$$r = [x^2 + (y-h)^2]^{1/2} \quad (75)$$

$$\Psi_e = 0.11 * \cos\left(\frac{\pi x}{0.6}\right) \quad (76)$$

$$\Psi = \Psi_b + \Psi_i + \Psi_l + \Psi_e \quad (77)$$

Además, se considera que el parámetro  $h=4.5$  y  $r_o = 0.5$  en las ecuaciones (de 72-77) que se adecua a las condiciones de longitud equivalente elegida.

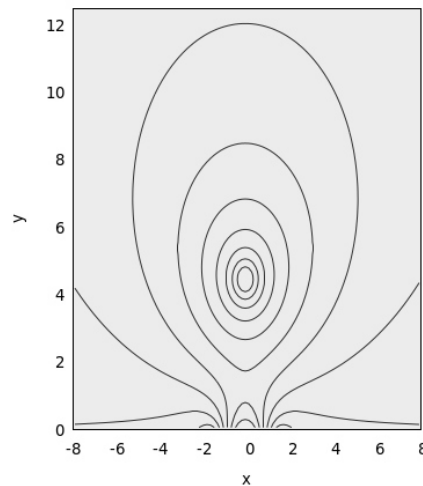


Figura 5.21.a) Cuerda de flujo simulada escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

### Condiciones Iniciales y de frontera

Las condiciones de frontera son las siguientes:

$$\frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial \vec{v}}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial B}{\partial \hat{n}} = 0 \quad (78)$$

Valor inicial de las variables a usar son:

Tabla 5.6.valores de parámetros iniciales.

Parámetro inicial	Valor
Densidad	$1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$
Temperatura	$10^6 K$
Velocidad	$500 \frac{km}{s}$
Resistividad inicial	$0.04 \Omega.m$
Campo emergente	$(0.11 * \cos(\frac{\pi x}{0.5}))$
Beta del plasma	0.01
Presión	$P = 1.5 Pa$

Fuente: Elaboración propia.

### Condición inicial de temperatura, densidad y Presión

Se asume una temperatura un informe  $T = T_o$ , la distribución de densidad inicial es:

$$\rho/\rho_0 = \begin{cases} 1 + \frac{2}{\beta} (1 - \frac{r^2}{r_o^2}), & r \leq r_o; \\ 1 & r > r_o; \end{cases} \quad (79)$$

Donde  $\beta$  es la relación del gas con el campo magnético y la presión inicial es  $P = P_o$ .

### 5.3.1 Resultados de la evolución Global de la cuerda de flujo (segundo escenario)

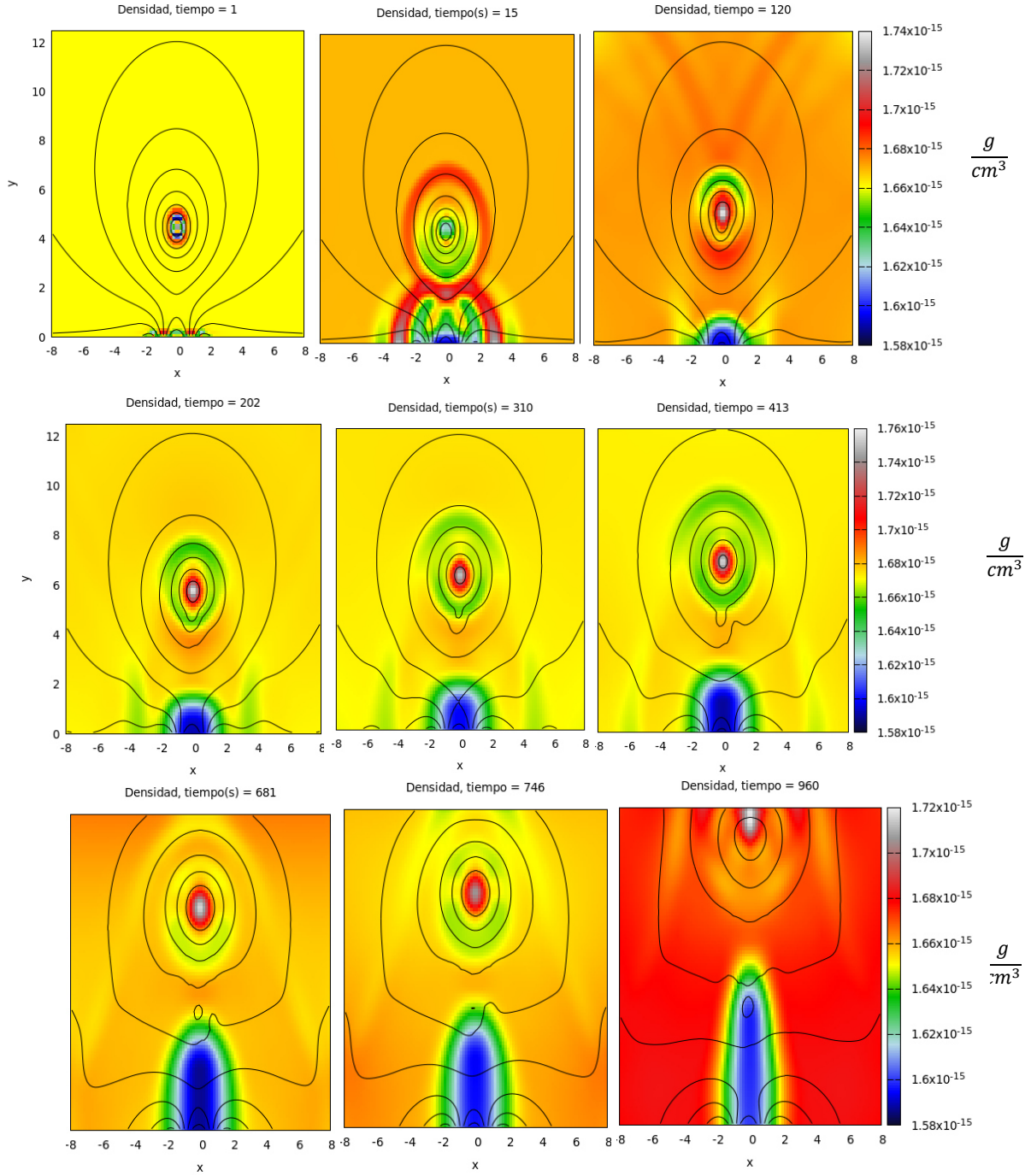


Figura 5.22. Evolución de la Densidad. Fuente: Elaboración propia.

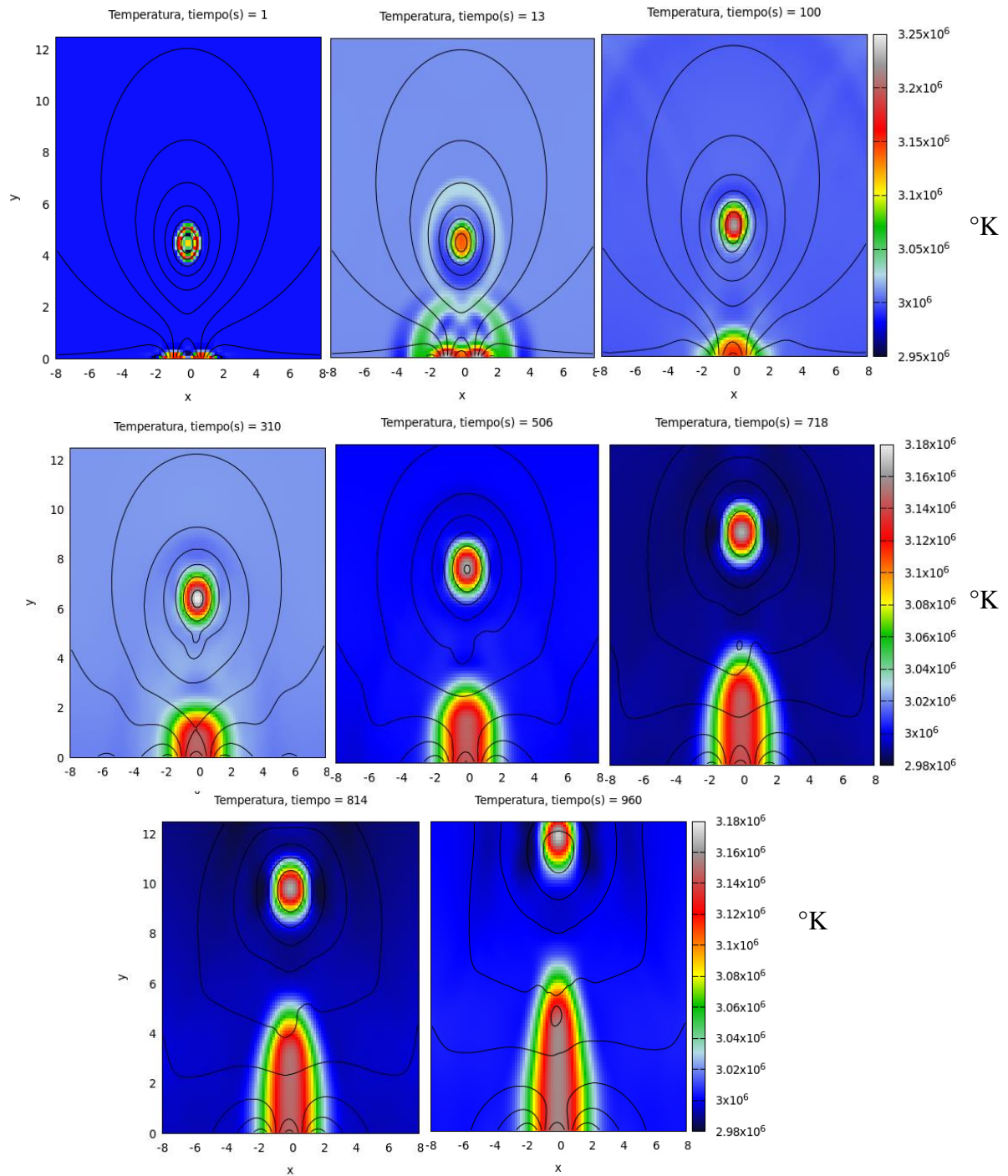


Figura 5.23. Evolución de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La secuencia imágenes (5.22) y (5.23) representan la evolución de densidad y temperatura (degradación de colores) y líneas magnéticas (líneas continuas negras).

Desde el  $t=0$  s, hasta  $t=147$  s, la cuerda de flujo se mantiene estable debido a que en este intervalo la tensión general (en dirección del eje Y negativo) y la gradiente de presión (en dirección del eje Y positivo) se encuentra en equilibrio.

A partir de  $t=147$  s hasta el  $t=310$  s las líneas de campo magnéticos alrededor del punto X (0,1.7), cambian su posición formando una región rectangular, llamada hoja de corriente. Que conforme el espesor de dicha región disminuye, la velocidad con la que las líneas de campo magnético se acercan acelera, disminuyendo la presión en esa región. Este comportamiento se debe a que los campos magnéticos por debajo del eje x, se cancelan en  $t=0$  s, debido a la reunión de la cuerda de flujo con el flujo emergente en la línea polaridad inversa; A pesar que ocurre en  $t=0$  s, esta interacción todavía no provoca un efecto visible sobre el sistema hasta  $t=147$  s donde el estado cuasi estático se pierde. Ya que para a este punto la presión magnética general disminuye abruptamente con un pendiente pronunciado (Figuras 5.29 y 5.31).

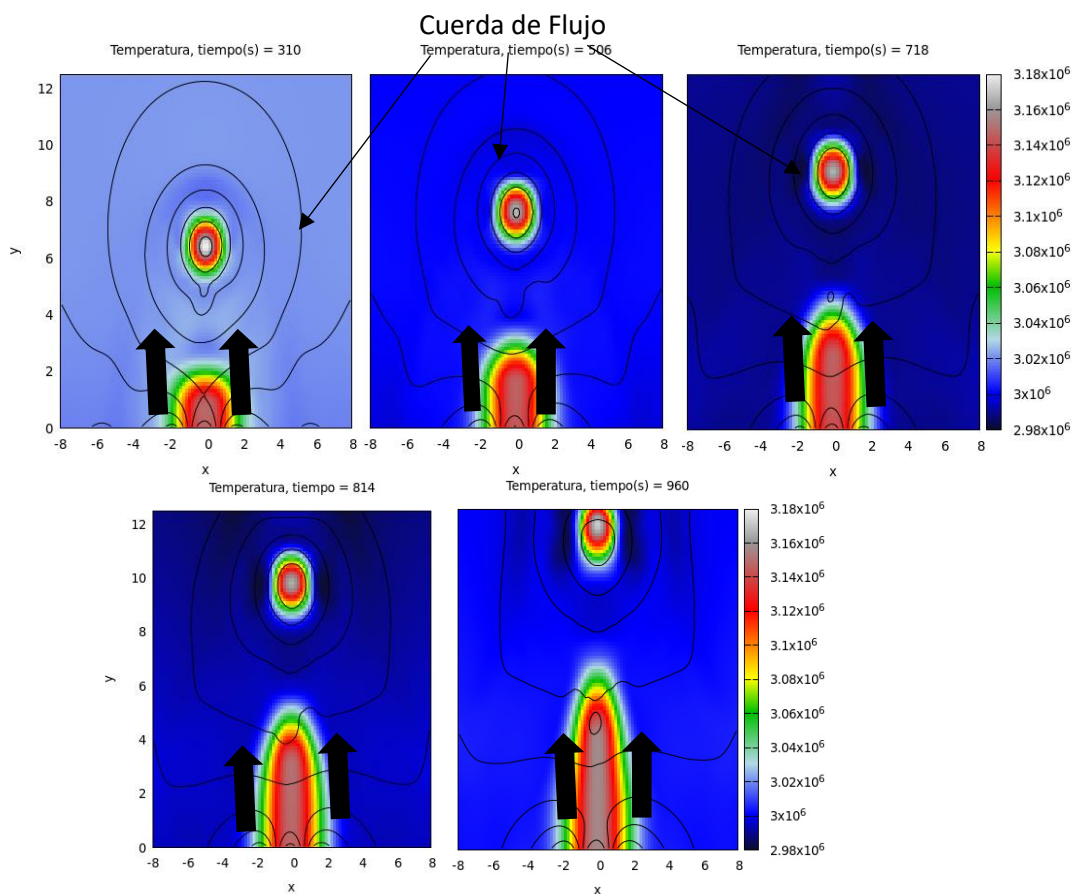


Figura 5.24. Evolución de cuerda de Flujo. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la gradiente de presión aumenta y se mueve hacia adentro del punto X, generando que las líneas de campo magnético se acerquen con rapidez justo debajo del punto X. Cuando ocurre este proceso la densidad de corriente eléctrica supera a la densidad de corriente crítica, la resistividad empieza a afectar el sistema, mejorando la difusión eléctrica. Permitiendo que el espacio entra las líneas de campo magnético que conforman la hoja de corriente disminuya hasta que las líneas se cortan. **En  $t=310$  s** ocurre la reconexión magnética, debido a que la resistividad logra vencer la fuerza de tensión contraria de las líneas de campo magnético (en dirección del eje X), cuando las líneas que conforman la hoja de corriente se cortan y vuelven a reconectar, disminuyendo la tensión magnética del sistema (en dirección del eje Y) generando los flujos de salida del plasma que elevan la cuerda de flujo hasta  $t=960$ s.

Como se ha mencionado líneas arriba la evolución global del sistema se puede dividir en tres etapas descritas en la Tabla 5.7:

Tabla 5.7. Etapas.

<i><b>Etapas</b></i>	<i><b>Característica</b></i>
<i><b>Etapas Cuasi estática</b></i>	Entre $0 \leq t(s) \leq 147$ , la cuerda de flujo se mantiene estable.
<i><b>Etapas de Reconexión Magnética</b></i>	Entre $147 \leq t(s) \leq 310$ , se forma la hoja de corriente y se produce la reconexión magnética.
<i><b>Etapas Post-Reconexión Magnética</b></i>	Entre $310 \leq t(s) \leq 960$ , la cuerda de flujo empieza a elevarse.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.2 Evolución de hoja de Corriente

En este segundo escenario la reconexión ocurre en el tiempo 310 s, 80 s después de la registrado en el primer escenario de simulación, esto se debe a que el valor de resistividad fue  $\eta = 0.04 \Omega \cdot m$  y la presión inicial también aumento. En este caso se sabe que en el modelo de reconexión rápida (pag,122) cuando el límite de densidad de corriente eléctrica crítica ( $j_c=0.5$

$\frac{A}{m^2}$ ) es superado, la resistividad se “activa”, generando una liberación de energía súbita y sobre todo disminuyendo la energía magnética durante la fase impulsiva de la fulguración solar. Antes de este proceso la densidad crítica de corriente eléctrica no es superada por la densidad de corriente eléctrica, la resistividad es cero por lo que en las ecuaciones MHD ya no consideran el tensor de resistividad ni sus efectos sobre el sistema.

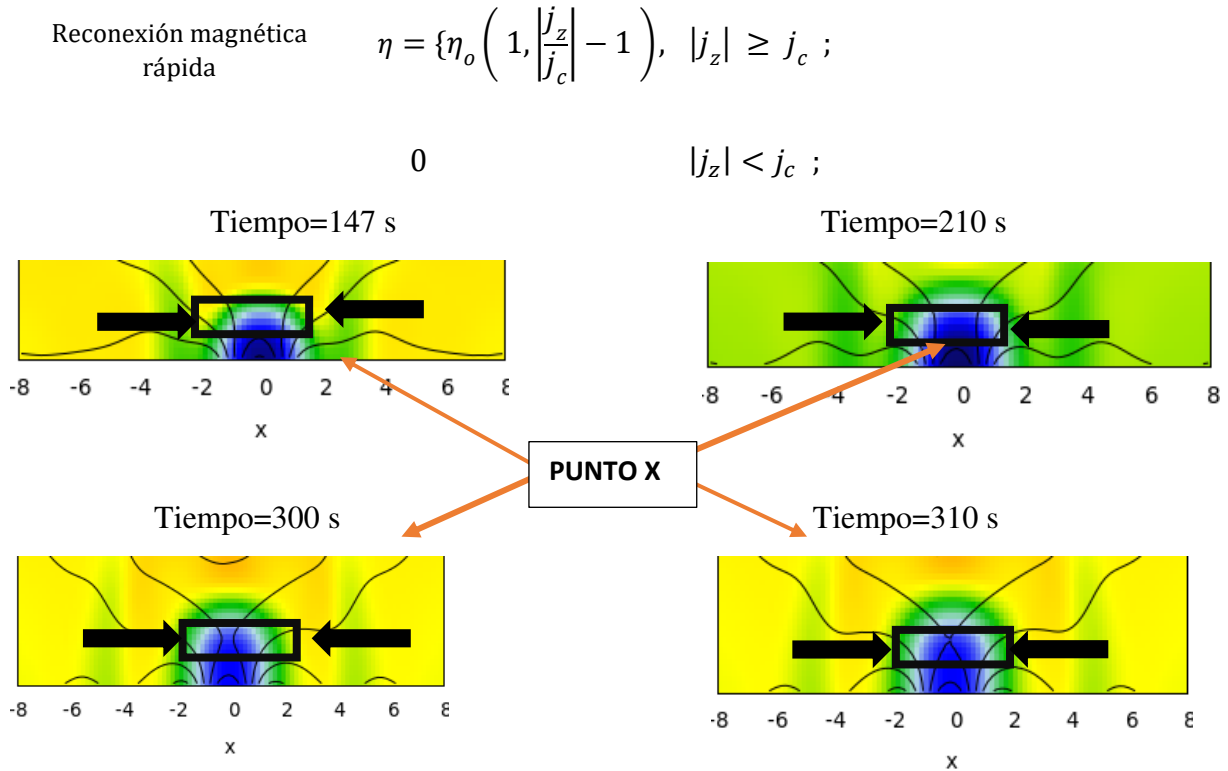


Figura 5.25. Evolución de la hoja de corriente alrededor del punto x donde ocurre la reconexión magnética. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en figura 5.25, la hoja de corriente empieza a formarse a partir de  $T=147$  s cuando el flujo se mueve a una velocidad de 10.69 km/s. Esta evolución es bastante rápida (desde  $t=147$  s hasta  $t=309$  s), debido a que la gradiente de presión se dirige hacia el punto X, lugar donde en el  $t=310$  s ocurre el corte y posterior reconexión de los campos magnéticos; Con una velocidad de 12.39108331 km/s.

Desde el  $t=147$  s hasta  $t=310$  s a medida que la hoja de corriente eléctrica va disminuyendo su área, esta va elevándose y generando que la cuerda de flujo pierda su estado de equilibrio y



salga de la fase cuasi estática. Además, se observa que el espesor de la hoja de corriente  $t=147$  s es de 2 cm en la malla de simulación hasta ser  $< 0.5$  cm tiempo después.

Desde  $T=310$  s hasta  $t=960$  s, después del corte y la reconexión de los campos magnéticos ocurre la conversión de energía magnética a energía térmica y energía cinética, los flujos de salida de plasma en dirección del eje Y, junto con la continua disminución de presión en el medio genera que la cuerda de flujo sea expulsada.

Tabla 5.8.Velocidad

Tiempo(S)	Velocidad(km/s)
0	0
30	3.1286
40	1.42
60	3.0822
80	5.9093
120	9.5752
140	10.4386
160	10.9713
230	11.687
270	12.0671
300	12.3287
310	12.3911
400	12.8602
500	14.041
600	14.2303
700	12.5581
800	13.9384
900	16.877
960	18.6075

*Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede observar en la figura 5.26 b, la velocidad en el punto X (0,1.7). presenta una subida lenta de velocidad partiendo en el  $t=0$  s hasta  $t=200$  s alcanzando una velocidad máxima de 11.34 km/s. Desde  $200 \leq t(s) \leq 500$  hay una aceleración de velocidad, a continuación, entre  $t=570$  s hasta  $t=610$  s hay un descenso de velocidad llegando al mínimo valor 12.5 km/s en este tramo, luego a partir de  $610 \leq t(s) \leq 960$  se observa una nueva aceleración alcanzando un valor máximo de 18.6 km/s. El primer tramo de subida lenta de la velocidad se produce por el descenso de la presión y la interacción del campo emergente con la configuración

magnética inicial, luego la segunda aceleración se produce antes y después de la reconexión en  $t=310$  s. Desde este punto la velocidad va aumentando producto de los flujos de plasma de salida en la reconexión además de la energía liberada en esta etapa de la fulguración solar M4.4. De  $t= 610$  s se registra un breve descenso de la velocidad y luego una aceleración hasta  $t=960$  s, que se produce debido a que ahora la cuerda de flujo no tiene fuerza de tensión que se oponga a su movimiento.

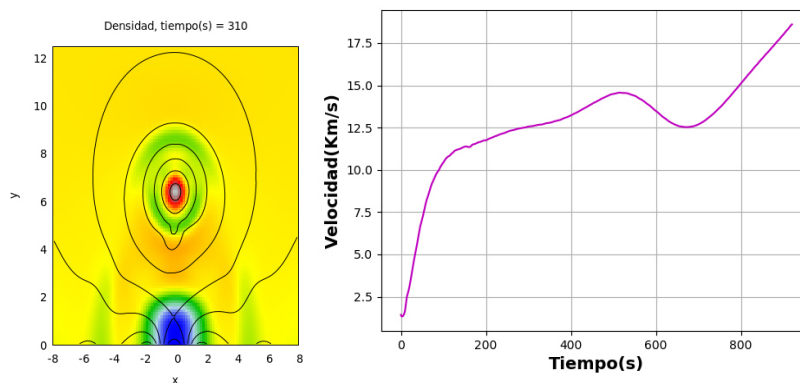


Figura 5.26. a)Reconexión magnética b)Evolución de la velocidad en hoja de Corriente.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3 Evolución de Velocidad de la Cuerda de Flujo

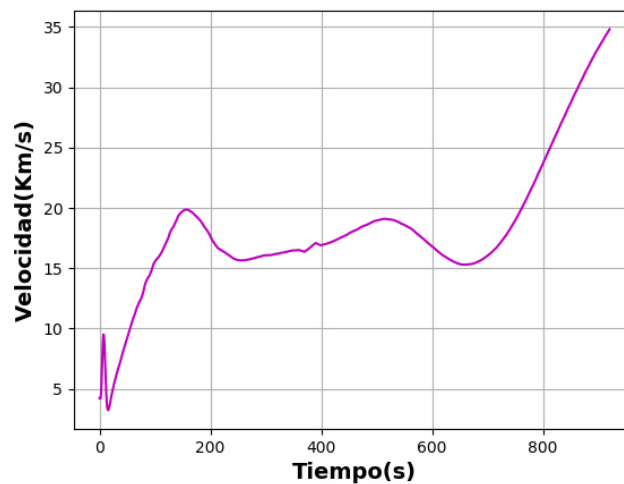


Figura 5.27. Gráfico de evolución de velocidad en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Desde  $0 \leq t(s) \leq 40$  la velocidad inicial aumenta hasta 8 km/s, luego en  $t=40$  s decrece en 4.3 km/s posteriormente de  $60 \leq t(s) \leq 180$  empieza una aceleración de la cuerda de flujo registrando un valor máximo de 20 km/s. Desde  $180 \leq t(s) \leq 230$  la velocidad decrece hasta 15.6 km/s. A partir de  $230 \leq t(s) \leq 500$  la velocidad disminuye de 15.5 km/s a 19.2 km/s,

para luego en  $t=670$  s alcanzar el valor de 15.2 km/s, y a partir de este tiempo acelerar hasta llegar al valor 34.8 km/s en  $t=960$  s.

En el primer tramo desde  $0 \leq t(s) \leq 180$  el aumento lento de velocidad se debe a que se inició la cancelación de flujo producto de la interacción del campo magnético emergente con el campo cuadrupolar de fondo, la imagen de corriente y la línea de corriente en el medio de la línea de inversión de polaridades o canal de filamento. Por otro lado, desde  $230 \leq t(s) \leq 500$  donde la hoja de corriente empieza a formarse por lo que la velocidad disminuye en la zona, además que la tensión magnética en contra de la hoja de corriente (eje x) aumenta, esto ayuda a que las líneas de campo se reúnan alrededor del punto X. Después ocurre la reconexión magnética y la cuerda de flujo registra un aumento de velocidad esto es generado por la presencia de los flujos de salida del plasma de reconexión magnética que permiten que la cuerda de flujo se eleve con mayor velocidad. De  $670 \leq t(s) \leq 960$  se registra el valor máximo de velocidades en 34.8 km/s, con una última aceleración que expresa el movimiento de la cuerda de flujo alejándose de la atmosfera con mayor velocidad. Como se menciona en el escenario 1 de simulación, se puede ver que la primera fase de aumento de velocidad lenta corresponde a la evolución cuasi estática, la primera aceleración a la formación de la hoja de corriente y la última aceleración a la etapa post reconexión durante la fase de liberación de energía de la fulguración solar M4.4.

#### 5.3.4 Evolución de Temperatura

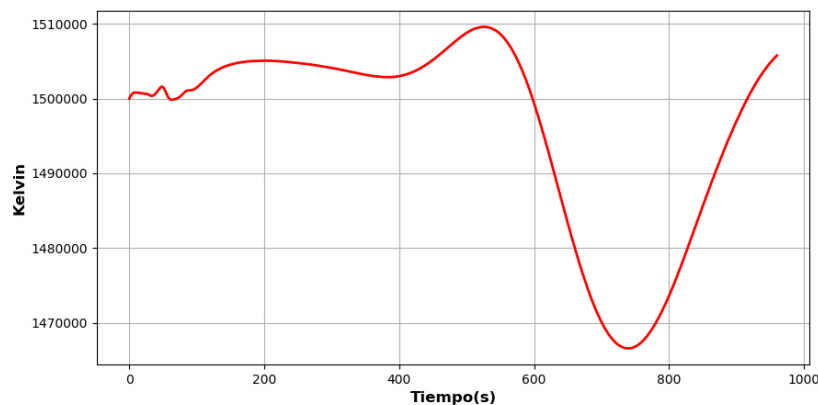


Figura 5.28. Evolución temporal de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 5.28** representa la evolución temporal de la temperatura de la cuerda de flujo. Desde  $t=0$  s la curva de temperatura de plasma registra un valor de  $1\,500\,000\text{ }^{\circ}\text{K}$  aumentando hasta  $1\,505\,079.9858\text{ }^{\circ}\text{K}$  en  $t=200$  s. En el intervalo de tiempo desde  $200 \leq t(s) \leq 400$ , la temperatura posee un valor promedio de  $1504021.97\text{ }^{\circ}\text{K}$ , se observa que entre  $400 \leq t(s) \leq 500$  un valor máximo de  $1\,5088\,07.3694\text{ }^{\circ}\text{K}$ . De lo anteriormente descrito se puede inferir que en el intervalo  $0 \leq t(s) \leq 500$  la temperatura ha registrado un aumento constante debido a que ocurre la reconexión magnética, que calienta el plasma, proceso que ocurre durante la fase de liberación de energía de la fulguración solar M4.4. En la secuencia de imágenes (Figura 5.23), las zonas con mayor temperatura son: Las de la región del plasmoide y la zona en forma de cúspide debajo del punto X. A partir de  $t=500$  s hasta  $t=780$  s existe una rápida disminución de temperatura registrando un valor de  $1\,469\,903.2534\text{ }^{\circ}\text{K}$  en  $t=780$  s. Y en el intervalo de  $780 \leq t(s) \leq 960$  un aumento de temperatura, durante esta etapa la cuerda de flujo aumenta su tamaño y se aleja con mayor velocidad de la superficie.

Tabla 5.9.Evolución de Temperatura.

Tiempo(s)	Temperatura( $^{\circ}\text{K}$ )
0	1500000
30	1500480.968
40	1500793.499
60	1499934.632
80	1500681.383
120	1503177.025
140	1504235.643
160	1504773.323
230	1504955.017
270	1504552.183
300	1504115.561
310	1503939.877
400	1503012.304
500	1508807.369
600	1499347.177
700	1470080.061
800	1473596.989
900	1496998.904
960	1505775.536

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.5 Evolución de Presión de gas

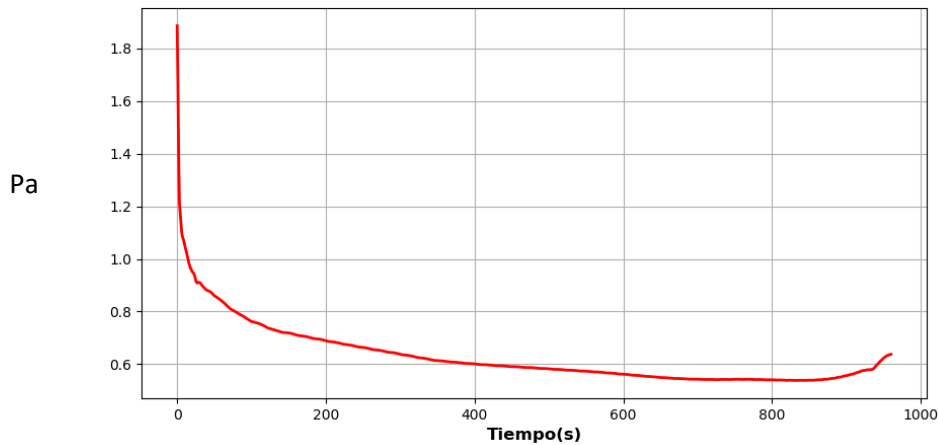


Figura 5.29.Evolución de Presión. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la presión promedio de la cuerda de flujo. Desde  $t=0$  s la presión decae drásticamente de 1.885 Pa a 0.7 Pa en  $t=200$  s, luego hasta  $t=850$  s los valores de la presión siguen disminuyendo, pero la variación de presión  $\Delta p$  entre  $200 \leq t(s) \leq 800$  es 0.2 Pa, mucho menor en comparación a la primera etapa en donde  $\Delta p$  entre  $(0 \leq t(s) \leq 200)$  es de 1.19 Pa. Finalmente, entre  $850 \leq t(s) \leq 960$  se registra un aumento de presión poco considerable.

Tabla 5.10.Evolución de Presión.

Tiempo(s)	Presión(Pa)
0	1.8859
20	0.9531
30	0.9112
40	0.881
50	0.8604
60	0.8404
80	0.7966
90	0.7801
110	0.7546
120	0.7411
130	0.7313
140	0.7223
160	0.7113
230	0.674
270	0.6539
300	0.6383
310	0.6339
400	0.6013
500	0.5825
800	0.5408
900	0.5568
960	0.6377

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.6 Evolución de Densidad

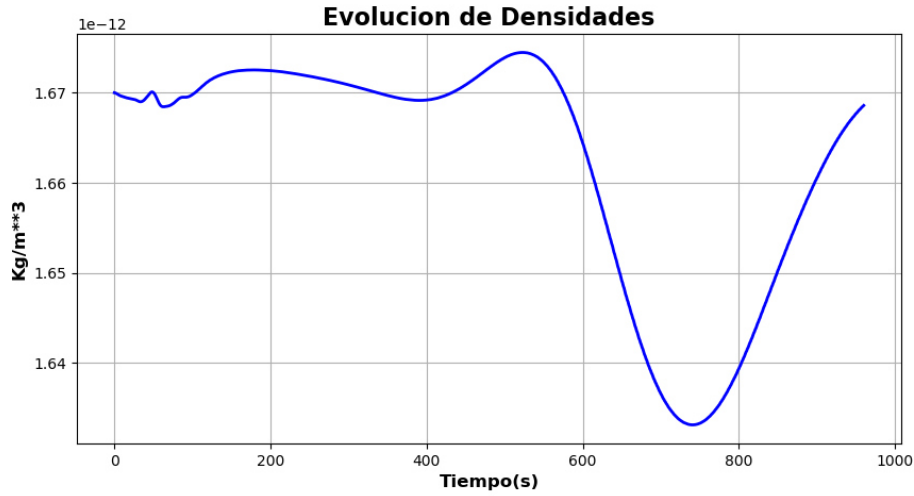


Figura 5.30.Evolución de densidad. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la densidad promedio. En el intervalo de  $0 \leq t(s) \leq 100$  se registran valores de densidad entre  $1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  y  $1.6697 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ . Entre  $100 \leq t(s) \leq 200$  el valor incrementa de  $1.6697 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  a  $1.6724 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , el valor de la densidad en  $t=400$  s es  $1.669 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , luego en  $t=505$  s se registra un valor de  $1.6741 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ . En resumen desde  $t=0$  s hasta  $t=505$  s la densidad no varía significativamente, lo mismo se puede observar en la secuencia de imágenes de evolución de densidades (Figura 5.22). Finalmente entre  $510 \leq t(s) \leq 720$  hay una disminución considerable hasta  $1.634 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , para luego aumentar su valor hasta  $1.668 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  en  $t=960$  s.

La figura 5.30, muestra que la evolución de la densidad que se divide en: Una fase de subida lenta, descenso y un aumento de densidad. Este comportamiento se encuentra de acorde a la evolución temporal de presión magnética que decrece constantemente y a la velocidad que también presenta las fases mencionadas líneas arribas.

Tabla 5.11. Evolución de densidad

Tiempo(s)	Densidad(kg/m**3)
0	$1.67 \times 10^{-12}$
30	$1.669 \times 10^{-12}$
40	$1.6694 \times 10^{-12}$
60	$1.6685 \times 10^{-12}$
80	$1.6691 \times 10^{-12}$
120	$1.671239 \times 10^{-12}$
140	$1.672088 \times 10^{-12}$
160	$1.67245 \times 10^{-12}$
230	$1.67213 \times 10^{-12}$
270	$1.671488 \times 10^{-12}$
300	$1.6709 \times 10^{-12}$
310	$1.67065 \times 10^{-12}$
400	$1.6692 \times 10^{-12}$
500	$1.673896 \times 10^{-12}$
600	$1.6644 \times 10^{-12}$
700	$1.63659 \times 10^{-12}$
800	$1.6394 \times 10^{-12}$
900	$1.6605 \times 10^{-12}$
960	$1.6686 \times 10^{-12}$

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.7 Evolución de Presión Magnética

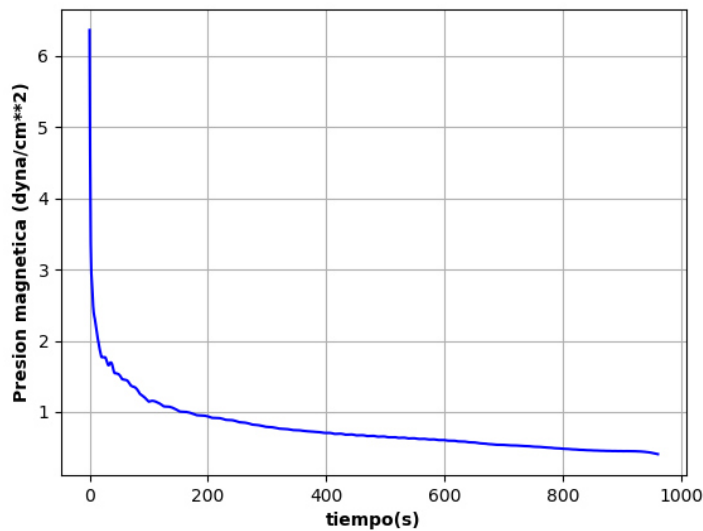


Figura 5.31. Presión magnética. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.31 representa la evolución temporal de la presión magnética promedio. En el intervalo de  $0 \leq t(s) \leq 200$  la presión decae drásticamente de  $6.3622 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  a  $0.9366 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ .

Durante este intervalo el  $\Delta P_{mag} = 5.4256 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  es grande debido a que desde  $t=0$  s (cuando

ocurre la interacción entre el flujo emergente y la cuerda de flujo), la presión magnética decrece favoreciendo las condiciones descritas en la sección (5.3.2) necesarias para la reconexión magnética. Entre  $200 \leq t(s) \leq 600$  la presión magnética decae de  $0.9366 \frac{dyna}{cm^2}$  a  $0.6049 \frac{dyna}{cm^2}$ , en este intervalo el  $\Delta P_{mag} = 0.3317 \frac{dyna}{cm^2}$ . Ocurriendo, la reconexión magnética en  $t=310$  s como se puede observar en la figura 5.31, la disminución de presión durante este intervalo es menos drástica en comparación al primer intervalo. Finalmente en  $t=960$  s la presión magnética alcanza el valor de  $0.4074 \frac{dyna}{cm^2}$ .

## 5.4 Tercer Escenarios de Simulación

En esta sección se resumirá el modelo numérico mostrado en el capítulo 4 para el escenario 3:

**Tiempo:** 960 s, de la evolución temporal de la cuerda de flujo de la fulguración de estudio de los datos de (AIA/SDO) desde las 18:14 hasta las 18:30 UT.

**Tamaño de Malla:** En el eje X(fotosfera)  $-8 < x < 8$  y Y(atmosfera solar)  $0 < y < 12.5$ , discretizándolo en (100x100) a lo largo del eje **X y Y**. Donde 1 cm(malla)  $\approx$  5000 km.

**Configuración Magnética Inicial:** Donde  $\Psi_b$ =corriente de fondo campo cuadrupolar ( $C=0.22$ ),  $\Psi_i$ =campo magnético de imagen de corriente,  $\Psi_l$ =campo magnético de línea de corriente.  $\Psi_e = 0.11 * \cos(\frac{\pi x}{0.6})$  entre  $(-0.3 < x < 0.3)$ ,

$$\Psi_b = c \ln \left( \frac{[(x+0.3)^2 + (y+0.3)^2][(x-0.3)^2 + (y+0.3)^2]}{[(x+1.5)^2 + (y+0.3)^2][(x-1.5)^2 + (y+0.3)^2]} \right) \quad (80)$$

$$\Psi_i = -\frac{r_o}{2} \ln [x^2 + (y+h)^2] \quad (81)$$

$$\Psi_l = \frac{r^2}{2*r_o} \quad r \leq r_o \quad (82)$$

$$\Psi_l = \frac{r_o}{2} - r_o \ln(r_o) + r_o \ln(r) \quad r > r_o$$

$$r = [x^2 + (y-h)^2]^{1/2} \quad (83)$$

$$\Psi_e = 0.11 * \cos\left(\frac{\pi x}{0.6}\right) \quad (84)$$



$$\Psi = \Psi_b + \Psi_i + \Psi_l + \Psi_e \quad (85)$$

Además, se considera que el parámetro  $h=4.5$  y  $r_o = 0.5$  en la ecuaciones (81-85) que se adecua a las condiciones de longitud equivalente elegida.

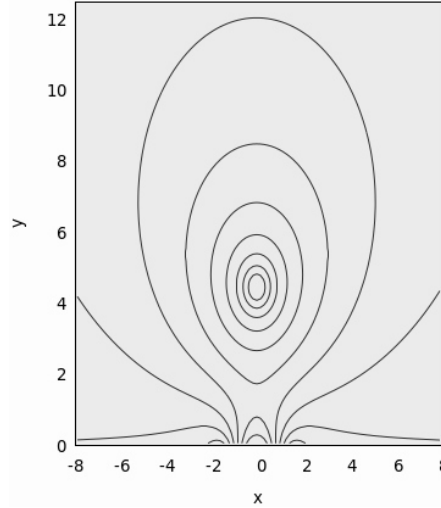


Figura 5.32. Cuerda de flujo simulada escenario 3. Fuente: elaboración propia.

### Condiciones Iniciales y de frontera

Las condiciones de frontera son las siguientes:

$$\frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial \vec{v}}{\partial \hat{n}} = 0, \frac{\partial B}{\partial \hat{n}} = 0 \quad (86)$$

Valor inicial de las variables a usar son:

Tabla 5.12. Valores de parámetros iniciales

Parámetro inicial	Valor
Densidad	$1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$
Temperatura	$10^6 K$
Velocidad	$500 \frac{km}{s}$
Resistividad inicial	$0.05 \Omega.m$
Campo emergente	$(0.11 * \cos(\frac{\pi x}{0.5}))$
Beta del plasma	0.01
Presión	$P = 2.0 Pa$

. Fuente: Elaboración propia.

### Condición inicial de temperatura, densidad y Presión

Se asume una temperatura un informe  $T = T_o$ , la distribución de densidad inicial es:

$$\rho/\rho_0 = \begin{cases} 1 + \frac{2}{\beta} (1 - \frac{r^2}{r_o^2}), & r \leq r_o; \\ 1 & r > r_o; \end{cases} \quad (87)$$

Donde  $\beta$  es la relación del gas con el campo magnético y la presión inicial es  $P = P_o$

### 5.4.1 Evolución Global

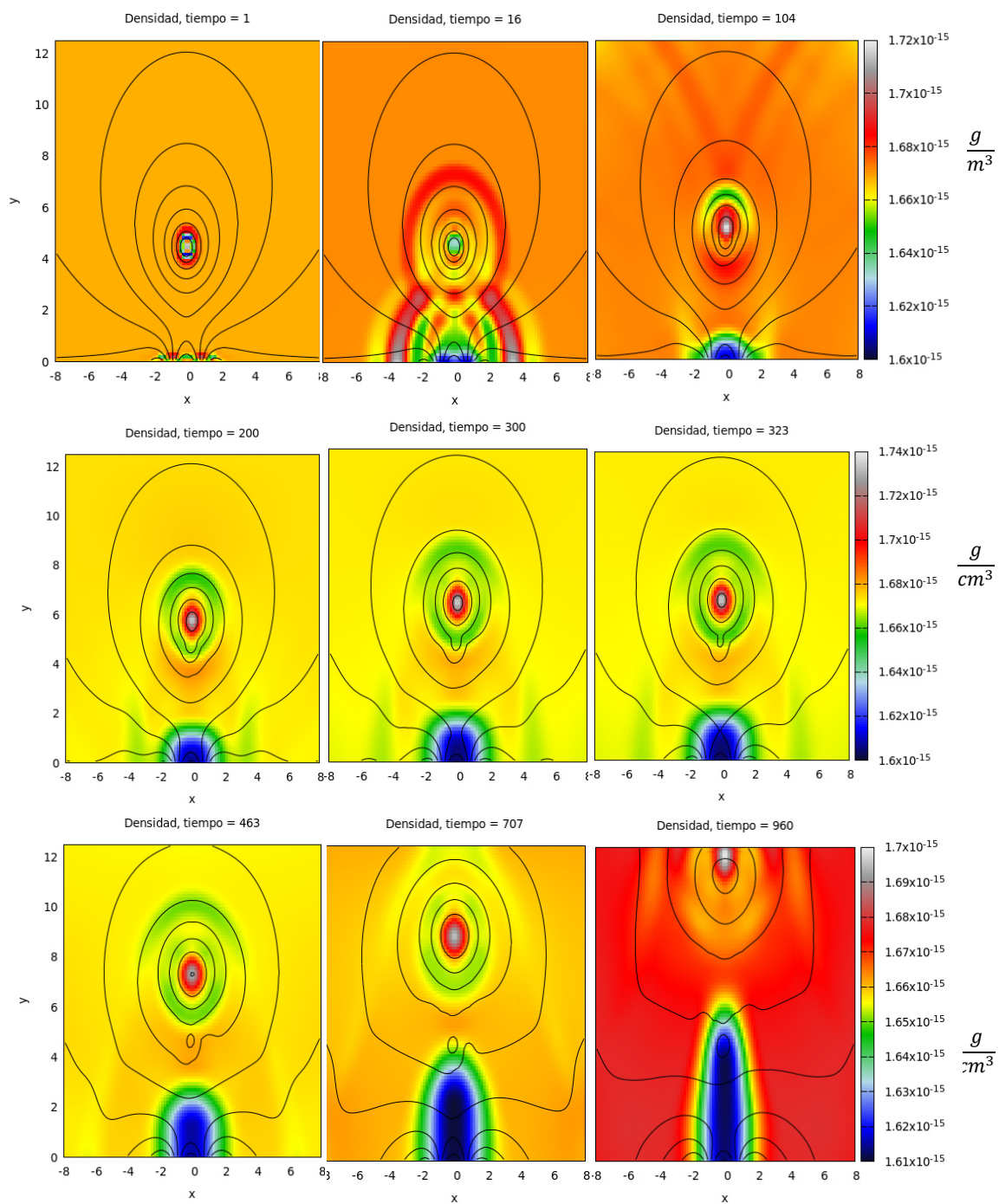


Figura 5.33. Evolución de Densidad. Fuente: Elaboración propia.

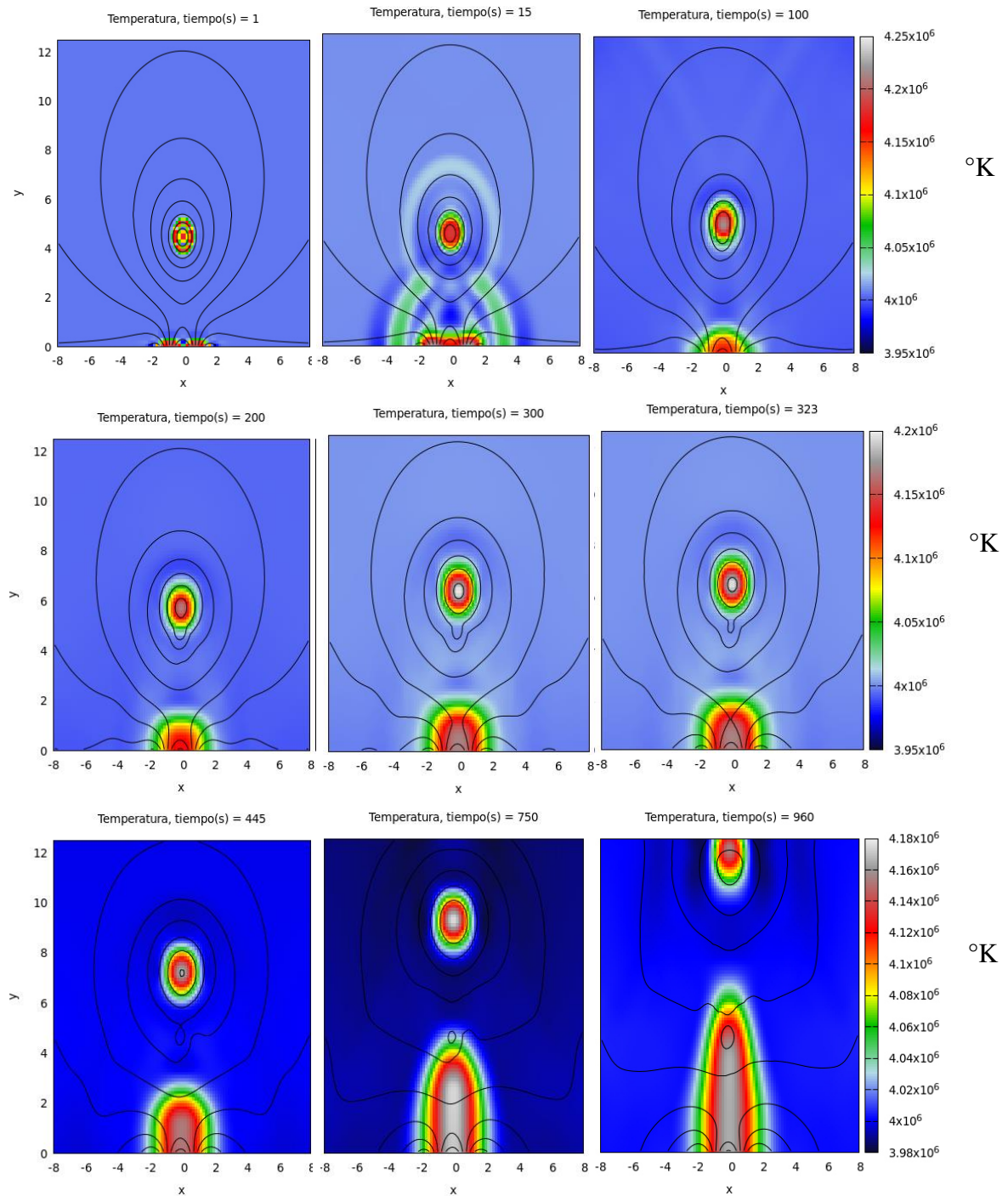


Figura 5.34. Secuencia de imágenes de cuerda de flujo y su temperatura.  
Fuente: Elaboración propia.

En la secuencia imágenes (5.33) y (5.34) representan la evolución de densidad y temperatura (degradación de colores) y líneas magnéticas (líneas continuas negras).

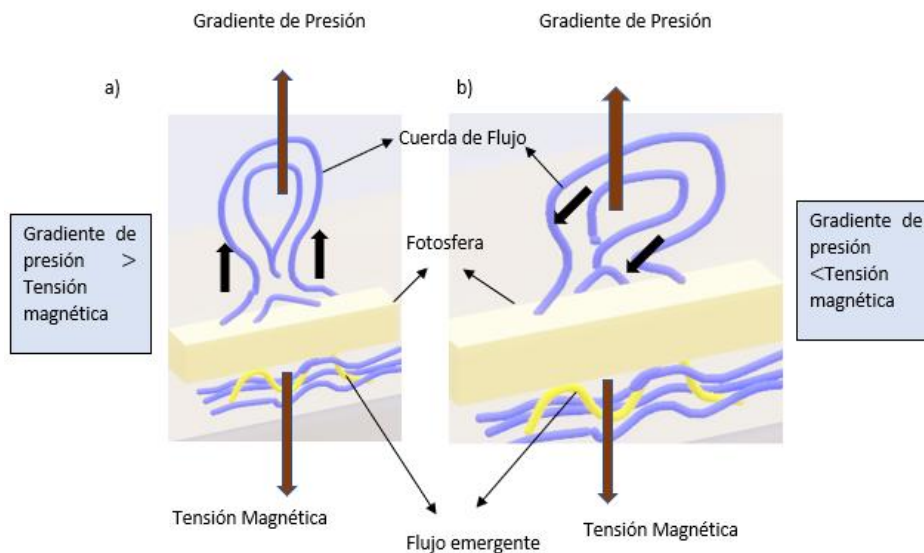


Figura 5.35.Comportamientos de la cuerda de flujo.

a) En el primer caso (el caso de simulación), la cuerda de flujo se eleva puesto que la gradiente de presión es mayor que la tensión magnética b) En el segundo caso la tensión magnética supera a la gradiente de presión y la cuerda de flujo cae. Fuente: Elaboración propia.

**Desde el  $t=0$ , hasta  $t=160$**  (ver figura 5.33), la cuerda de flujo se mantiene estable debido a que en un principio la tensión magnética general (en dirección del eje Y negativo) y la gradiente de presión (en dirección del eje Y positivo) se encuentra en equilibrio. La tensión magnética del sistema es la fuerza que se opone la elevación de la cuerda de flujo por encima de la fotosfera solar, es decir si esta es mayor que la gradiente de presión la cuerda de flujo no podría elevarse y terminaría cayendo sobre la superficie (Figura 5.35 b).

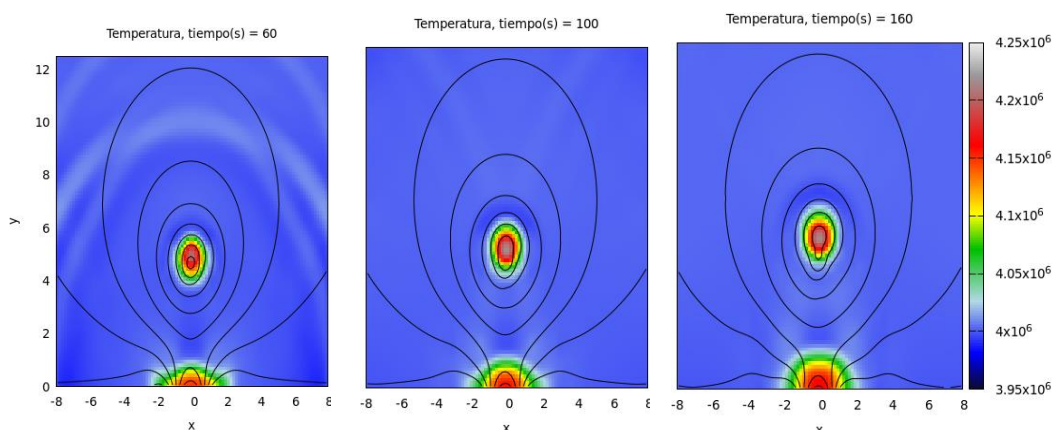


Figura 5.36.Evolución de la cuerda de flujo de  $t=0$  s hasta  $t=160$  s. Fuente: Elaboración propia.

**A partir del  $t=160$  s hasta el  $t= 323$  s** las líneas de campo magnéticos por debajo del punto (0,1.7), considerado como punto X (donde ocurrirá la reconexión magnética) empiezan a

acercarse con mayor velocidad disminuyendo el área entre ellas, generando la formación de la hoja de corriente. Este comportamiento se debe a que los campos magnéticos por debajo del eje x, se cancelan debido a la reunión campo magnético emergente  $0.11 * \cos\left(\frac{\pi x}{0.6}\right)$  y la cuerda de flujo en medio del canal de filamento, a pesar que la cancelación ocurre  $t=0$  s está todavía no provoca un efecto visible sobre el sistema hasta después  $t=160$  s donde el estado cuasi estático se pierde. Ya que, para a este punto como se mencionó en el primer y segundo escenario de simulación, la presión magnética general disminuye abruptamente con una pendiente pronunciada, por lo tanto, la gradiente de presión aumenta y se mueve hacia adentro generando que las líneas de campo magnético se acerquen con rapidez justo debajo del punto X. Se debe mencionar, que la beta coronal es  $\beta = 0.01$  es muy bajo y la presión magnética supera a la presión del gas, por lo que el movimiento del fluido está regido por el comportamiento del campo magnético y los cambios de presión magnética afectaran directamente la evolución del sistema.

**En el  $t=323$  s** ocurre la reconexión magnética, la resistividad anómala se “activa”, entonces, la difusión de la corriente eléctrica es mayor entre los campos magnéticos que componen la hoja de corriente y ambos campos terminan siendo sometidos a la fuerza horizontal de la tensión magnética contraria a la hoja de corriente. A partir de este tiempo la morfología magnética va cambiando, la cuerda se corta y empieza a elevarse por acción de los flujos de salida del plasma y se eyecta la cuerda de flujo hacia la parte superior de la corona, para luego salir al medio interplanetario (aunque esta fase no está dentro de nuestra simulación).

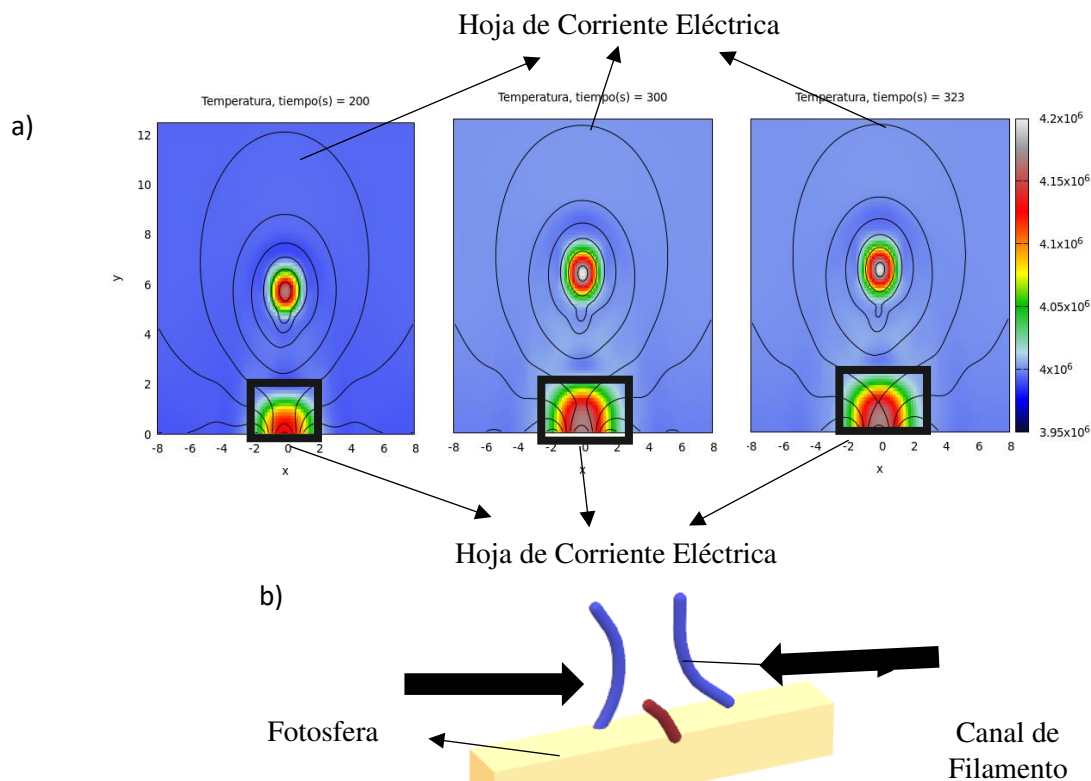


Figura 5.37.a) Evolución de la cuerda de flujo de  $t=200$  s hasta  $t=323$  s b) hoja de corriente.

Fuente: Elaboración propia.

En esta simulación la reconexión ocurre en  $t=323$  s, 13 segundos después que el escenario de simulación anterior, esto se debe a que la función de presión inicial es 2.0 Pa. Con el escenario actual de simulación, la función de presión inicial sigue siendo de vital importancia ya que retrasa el tiempo de reconexión. Puesto que para que ocurre la inestabilidad necesaria para la formación de la hoja de corriente y la posterior reconexión, la presión magnética debe disminuir para que la gradiente de presión aumente y logre vencer a la tensión magnética como se muestra en la figura 5.35 a.

Como se ha mencionado líneas arriba la evolución global del sistema se puede vivir en tres etapas como ocurre en el escenario de simulación 1 y 2 descritas en la Tabla 5.13:



Tabla 5.13.Etapas

<i>Etapas</i>	<i>Característica</i>
<b><i>Etapas Cuasi estática</i></b>	Entre $0 \leq t(s) \leq 160$ , la cuerda de flujo se mantiene estable.
<b><i>Etapas de Reconexión Magnética</i></b>	Entre $160 \leq t(s) \leq 323$ , se forma la hoja de corriente y se produce la reconexión Magnética.
<b><i>Etapas Post-Reconexión Magnética</i></b>	Entre $323 \leq t(s) \leq 960$ , la cuerda de flujo empieza a elevarse.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.4.2 Evolución de hoja de Corriente

La resistividad en este caso es considerada uniforme en  $\eta = 0.05 \Omega.m$ ,  $j_c = 0.5 \frac{A}{m^2}$  y la función de resistividad se expresa como:

$$\eta = \begin{cases} \eta_o \left( 1, \left| \frac{j_z}{j_c} \right| - 1 \right), & |j_z| \geq j_c ; \\ 0 & |j_z| < j_c ; \end{cases} \quad (88)$$

Como se mencionó en el escenario 1 y 2 en el sistema de arriba, la resistividad al introducirse al sistema cuando,  $|j_z| \geq j_c$  genera que la reconexión se active, generando flujo de salida de reconexión, que son plasmas eyectados en dirección del eje Y (positivo), durante la fase de liberación de energía de la fulguración solar.

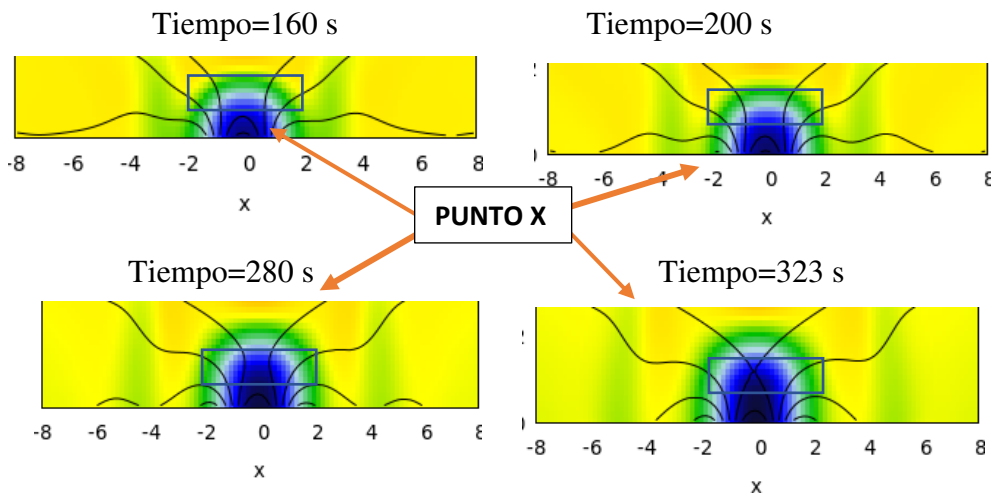


Figura 5.38.Evolución de la Cuerda de Flujo. Fuente: Elaboración propia.

**Desde el  $T=160$  s hasta  $t=323$  s**, como se puede observar en la secuencia de imágenes 5.38, la hoja de corriente se forma a partir de  $T=160$  s cuando el flujo se mueve a una velocidad de  $10.537$  km/s, a medida que la hoja de corriente eléctrica va disminuyendo su área, esta va elevándose y generando que la cuerda de flujo pierda su estado de equilibrio y salga de la fase cuasi estática, además, se observa que el espesor de la hoja de corriente disminuye drásticamente. La hoja de corriente se genera por la cancelación de la cuerda y el flujo emergente que produce una continua disminución de presión como ocurre en el primer y segundo escenario de diseño, la gradiente de presión aumenta venciendo a la fuerza de tensión magnética contraria en el eje Y, generando que las líneas de campos magnéticos se reúnan alrededor del punto X, empujados por la fuerza de tensión magnética en el eje X. Posterior a esto se activa la resistividad y ocurre la reconexión en  $t=323$  s con una velocidad de  $12.14$  km/s.

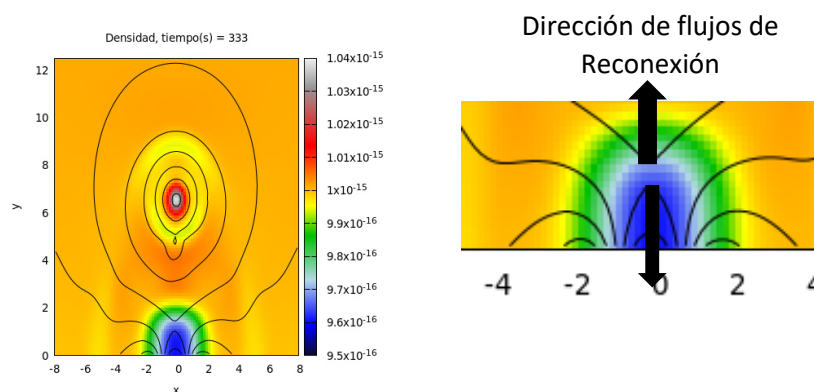


Figura 5.39.a)Cuerda de flujo b) Dirección de flujos de reconexión. Fuente: Elaboración propia.

**Desde  $T=323$  s hasta  $t=960$  s**, después del corte y la reconexión de los campos magnéticos sucede la conversión de energía magnética a energía térmica y energía cinética, durante la fase de liberación de energía de la fulguración solar. Se producen los flujos de salida de plasma en dirección del eje Y (ver figura 5.39 b), es por esta razón que el área alrededor del punto X aumenta su temperatura, además impulsan la elevación de la cuerda de flujo. Ya que la fuerza de tensión magnética en dirección del eje Y es la fuerza que se opone a la gradiente de presión, manteniendo el equilibrio que se pierde al disminuir la presión, sucediendo la reconexión magnética.



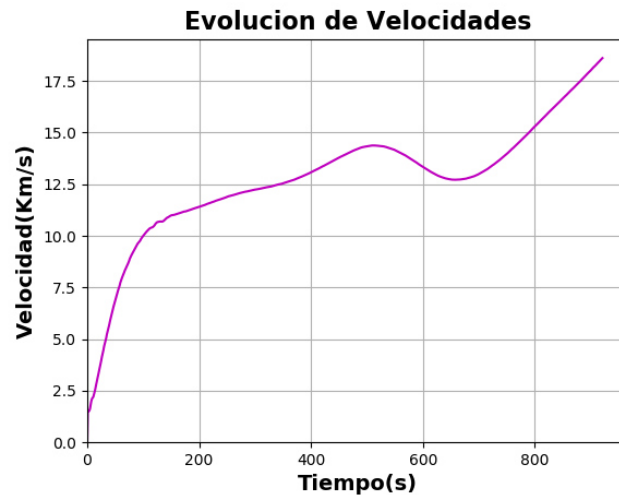


Figura 5.40.Evolución de velocidades. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.40 se presenta la evolución velocidad en el punto X (donde ocurre la reconexión). Entre el  $t=0$  s hasta  $t=200$  s, la velocidad tiene una subida lenta, alcanzando una velocidad máxima de 11.34 km/s. Seguidamente en  $200 \leq t(s) \leq 500$  se produce una aceleración de velocidad, en el intervalo de  $500 \leq t(s) \leq 620$  se registra un descenso de velocidad llegando al mínimo de 13.68 km/s. Luego entre  $620 \leq t(s) \leq 960$  ocurre nueva aceleración alcanzando un valor máximo de 18.60 km/s. Como se menciona en el escenario de simulación anterior. El primer tramo de subida lenta de la velocidad se produce por el descenso de la presión y la interacción del campo emergente con la configuración magnética inicial, luego la segunda aceleración se produce antes y después de la reconexión magnética en  $t=323$  s. Desde este punto la velocidad va aumentando producto de los flujos de plasma de salida de la reconexión además de la energía liberada en esta etapa. En  $t= 620$  s se registra un breve descenso de la velocidad y luego una aceleración, que se produce debido a que ahora la cuerda de flujo se libera de la fotosfera solar, ya que la gradiente de presión global supera a la fuerza de tensión global contraria en dirección del eje Y.

Tabla 5.14.Evolución de la velocidad en hoja de Corriente.

Tiempo(S)	Velocidad(km/s)
0	0
30	2.115
40	1.52
60	3.4328
80	5.9103
120	9.164
140	10.0363
160	10.5375
230	11.3269
270	11.7104
300	11.9751
310	12.0586
400	12.6442
500	13.9333
600	14.0047
700	12.7227
800	14.2451
900	16.9466
960	18.6094

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.4.3 Evolución de Velocidad de la Cuerda de Flujo

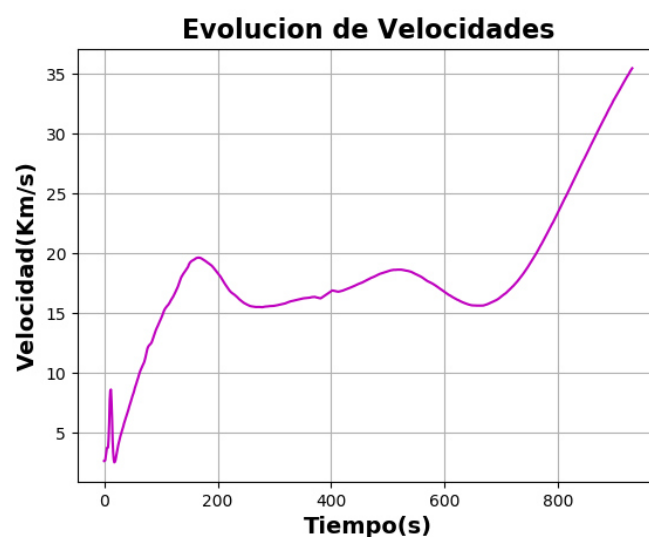


Figura 5.41.Gráfico de distribuciones de velocidades en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

En el intervalo de  $0 \leq t(s) \leq 20$  el valor máximo registrado es 8 km/s, posteriormente en  $t=20$  s decrece en 4.3 km/s. Desde este punto entre  $t=20$  s y  $t=180$  s la velocidad presenta un valor máximo de 19.9 km/s, seguidamente en el intervalo de  $180 \leq t(s) \leq 230$  la velocidad

decrece hasta 15.3 km/s. A partir de  $t=230$  s hasta  $t=500$  s la velocidad aumenta de 16.7 km/s a 17.25 km/s, finalmente en  $t=670$  s y  $t=960$  s la velocidad acelera de 15.75 km/s a 35.4 km/s.

La velocidad presenta 3 fases marcadas; Una de acenso lento desde  $0 \leq t(s) \leq 180$  en donde la interacción del campo magnético emergente y la configuración magnética inicial que contiene a la cuerda de flujo genera que la inestabilidad del sistema empiece. Luego de  $230 \leq t(s) \leq 500$  una nueva aceleración se produce, esta sucede durante la etapa pre y post reconexión magnética ya que esta pasa en  $t=323$  s. La última fase de  $670 \leq t(s) \leq 960$ , se produce una nueva aceleración por las salidas de plasma de reconexión magnética en la cuerda de flujo que se eleva con mayor rapidez puesto que el equilibrio se perdió y la fuerza de tensión fue vencida por la gradiente de presión.

Tabla 5.15.Velocidad de la cuerda de flujo.

Tiempo(S)	Velocidad De cuerda de Flujo (km/s)
0	0
30	2.6439
40	7.7207
60	4.9227
80	8.0817
120	13.4341
140	15.5389
160	17.2154
230	18.3568
270	16.0823
300	15.517
310	15.5155
400	16.3548
500	17.9367
600	17.6646
700	15.6648
800	20.7399
900	30.2646
960	35.4573

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.4.4 Evolución de Temperatura

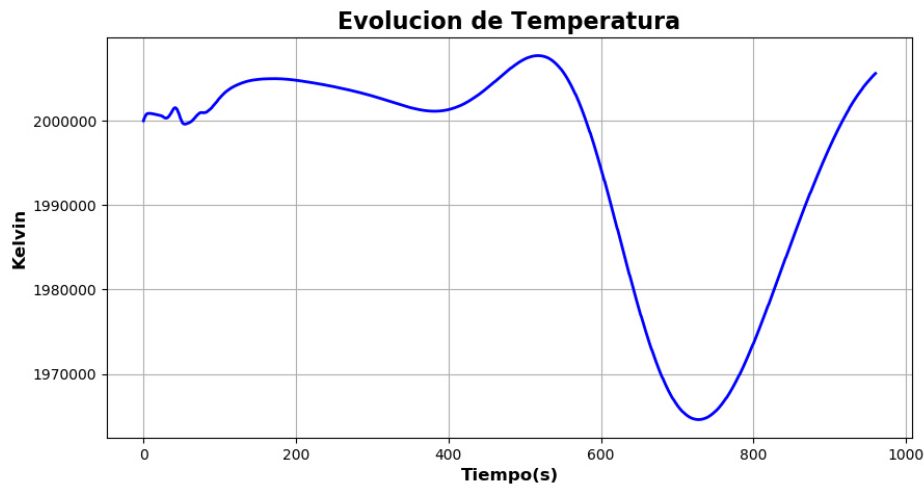


Figura 5.42. Evolución temporal de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la temperatura promedio de la cuerda de flujo. Desde  $t=0$  la curva de temperatura plasma registra un valor de 2 000 000.0 K aumentando hasta 2 004 807.31 °K en  $t=200$  s, posteriormente entre  $t=200$  s hasta  $t=400$  s la temperatura se registra un valor promedio 2 002 877.044 °K, después entre  $t=400$  s hasta 500 s se registra un valor máximo de 2 007 316.89 °K.

A partir de  $500 \leq t(s) \leq 780$ , se observa una rápida disminución de temperatura registrando un valor de 1 969 639.6 °K en  $t=780$  s. Desde  $780 \leq t(s) \leq 960$  existe un aumento de temperatura de 2 005 610.84 °K, durante esta etapa la cuerda de flujo aumenta su tamaño y se aleja con mayor rapidez de la superficie.

Las fluctuaciones de temperatura en el sistema están relacionadas con el comportamiento de los campos magnéticos y su interacción con el plasma. Puesto que desde  $t=0$  s hasta  $t=500$  s, ocurre la reconexión magnética y la energía se convierte en energía térmica y cinética dentro del plasma. Además, los flujos de salida de plasma calientan el medio circundante general en el punto X.

Tabla 5.16. Evolución de temperatura

Tiempo(s)	Temperatura(°K)
0	2000000
30	2000318.48
40	2001483.68
60	1999771.76
80	2000958.93
120	2004131.61
140	2004765.12
160	2004971.02
230	2004381.58
270	2003643.25
300	2002947.93
310	2002677.35
400	2001325.15
500	2007316.9
600	1994335.96
700	1966304.37
800	1973600.76
900	1996886.93
960	2005610.84

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.4.5 Evolución de Presión de gas

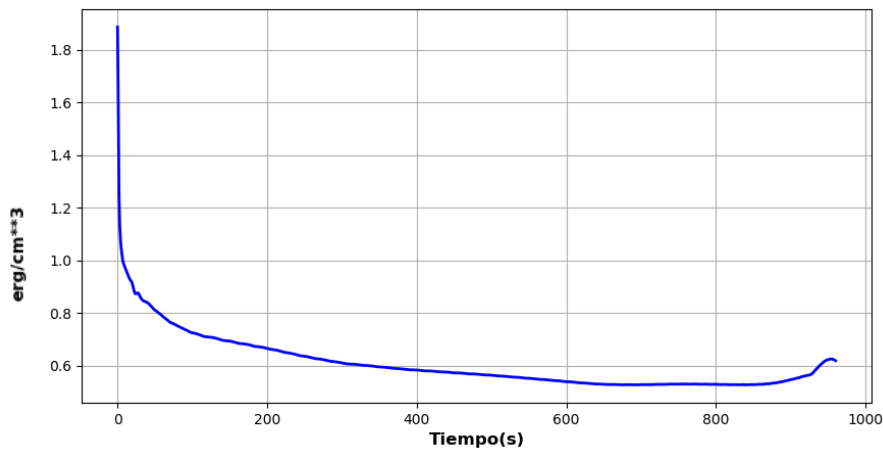


Figura 5.43. Evolución de Presión. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la presión promedio de la cuerda de flujo. Desde  $t=0$  s la presión decae drásticamente de 1.889 Pa a 0.67 Pa en  $t=200$ s. Posteriormente hasta  $t=850$  s la presión sigue decayendo, pero la variación de presión  $\Delta p$  entre  $200 \leq t(s) \leq 800$  es 0.136 Pa mucho menor en comparación a la primera etapa en donde

$\Delta p$  desde  $0 \leq t(s) \leq 200$  es de 1.235 Pa, luego desde  $t=850$  y  $t=960$  s hay un aumento de presión poco considerable.

Tabla 5.17. Evolución de Presión.

<i>Tiempo(s)</i>	<i>Presión (Pa)</i>
0	1.8899
20	0.9092
30	0.8645
40	0.8394
50	0.8117
60	0.7894
80	0.7521
90	0.7385
110	0.7172
120	0.7101
130	0.7061
140	0.6974
160	0.6866
230	0.6485
270	0.6259
300	0.6107
310	0.6069
400	0.5842
420	0.5803
470	0.5694
500	0.5645
600	0.5399
700	0.5287
800	0.5299
900	0.548
960	0.6196

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.4.6 Evolución de Densidad

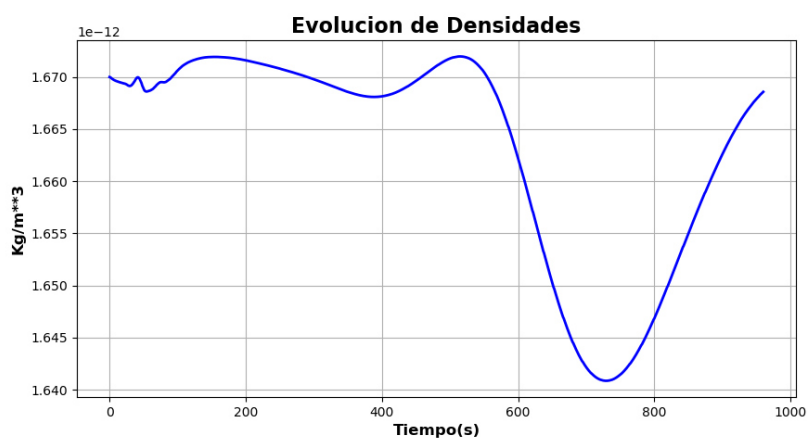


Figura 5.44.Evolución de densidad. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la densidad promedio. Desde  $0 \leq t(s) \leq 100$  la curva de la densidad del plasma registra un movimiento oscilatorio entre un valor de  $1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  y  $1.6706 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ . De  $t=100$  s a  $t=200$  s el valor incrementa de  $1.670 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  a  $1.6716 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , posteriormente entre  $t=200$  s hasta  $t=400$  s el valor de la densidad pasa de  $1.6716 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  a  $1.668 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ . Luego en  $t=505$  s se registra un valor de  $1.67179 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ . En resumen, desde  $0 \leq t(s) \leq 500$  la densidad no sufre variaciones significativas, seguidamente entre  $t=510$  s hasta  $t=720$  s se observa una disminución considerable hasta  $1.641 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , para luego aumentar su valor hasta  $1.6686 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  en  $t=960$  s.

Tabla 5.18.Evolucion de densidad.

Tiempo(s)	Densidad(kg/m**3)
0	$1.67 \times 10^{-12}$
30	$1.6694030 \times 10^{-12}$
40	$1.669143 \times 10^{-12}$
60	$1.669931612 \times 10^{-12}$
80	$1.66888468 \times 10^{-12}$
120	$1.66871623 \times 10^{-12}$
140	$1.6694901 \times 10^{-12}$
160	$1.66990022 \times 10^{-12}$
230	$1.6711940490648 \times 10^{-12}$
270	$1.671537207 \times 10^{-12}$
300	$1.6717533491 \times 10^{-12}$
310	$1.67188133976 \times 10^{-12}$
400	$1.6719241991 \times 10^{-12}$
500	$1.6711511066 \times 10^{-12}$
600	$1.6704293220 \times 10^{-12}$
700	$1.66979158 \times 10^{-12}$
800	$1.6695512 \times 10^{-12}$
900	$1.66814463 \times 10^{-12}$
960	$1.668506 \times 10^{-12}$

Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.7 Evolución de Presión Magnética

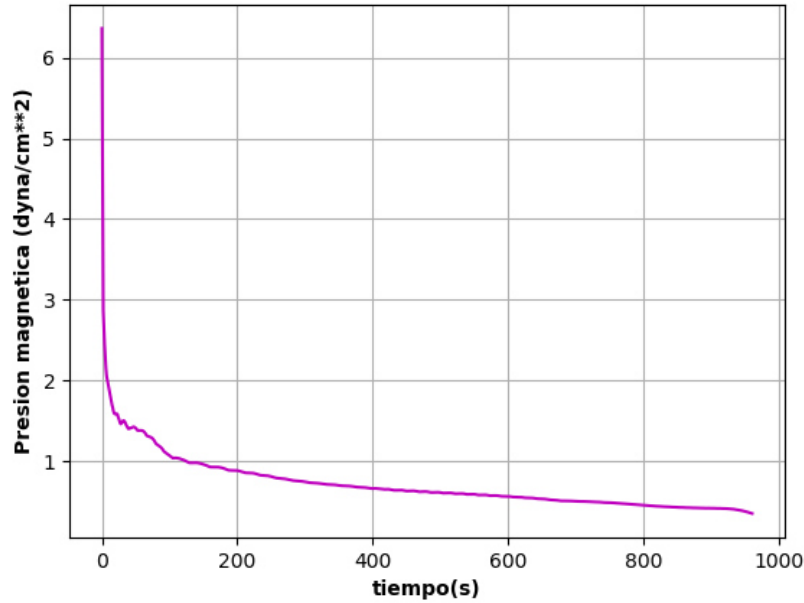


Figura 5.45.Presión magnética. Fuente: Elaboración propia.

La Figura anterior representa la evolución temporal de la presión magnética promedio de la. En el intervalo de  $0 \leq t(s) \leq 200$  la presión decae de  $6.3622 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  a  $0.8833 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ . Siendo el  $\Delta P_{mag} = 5.479 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ , grande debido al efecto producido por la interacción de la cuerda de flujo con el flujo magnético emergente en  $t=0$  s. Que altera el equilibrio del sistema favoreciendo las condiciones para la ocurrencia de la reconexión magnética en  $t=323$  s.

Entre  $200 \leq t(s) \leq 600$  la presión magnética decae de  $0.8833 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$  a  $0.565 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ , en este intervalo el  $\Delta P_{mag}$  es  $0.3183 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ , observándose que el  $\Delta P_{mag}$  es menor en comparación al primer intervalo, lo que representa que la presión magnética no presenta grandes cambios en su evolución temporal durante este intervalo. Ocurriendo en el mismo, la reconexión magnética y la etapa post reconexión magnética, que produce grandes cambios en la topología global de la cuerda de flujo. Finalmente, en  $t=960$  s la presión magnética tiene el valor de  $0.3512 \frac{\text{dyna}}{\text{cm}^2}$ .



## 6 . Capítulo VI: Análisis de Resultados

### 6.1 Análisis de la Descripción de Evento

Después de aplicar los criterios mencionados en el capítulo 3 se seleccionó la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 ocurrida en la región solar NOAA 11165 (18:10-18:41 UT). Donde se analizando las imágenes en AIA/SDO en las bandas (AIA 94 Å Y AIA 193Å), identificando una cuerda de flujo (estructura magnética de la prominencia) entre (18:14 UT-18:30 UT), en la cual estudiando la banda (AIA 193 Å) se observó que la parte inferior de la cuerda de flujo se deforma, comprimiéndose en la región X (Figura 6.2.a y 6.2.b). Esta geometría está relacionada dentro del modelo teórico (6.1.c) de fulguraciones solares con la presencia de reconexión magnética (inicio de la etapa de liberación de energía), que ocurre aproximadamente entre las (18:18 UT-18:19 UT).

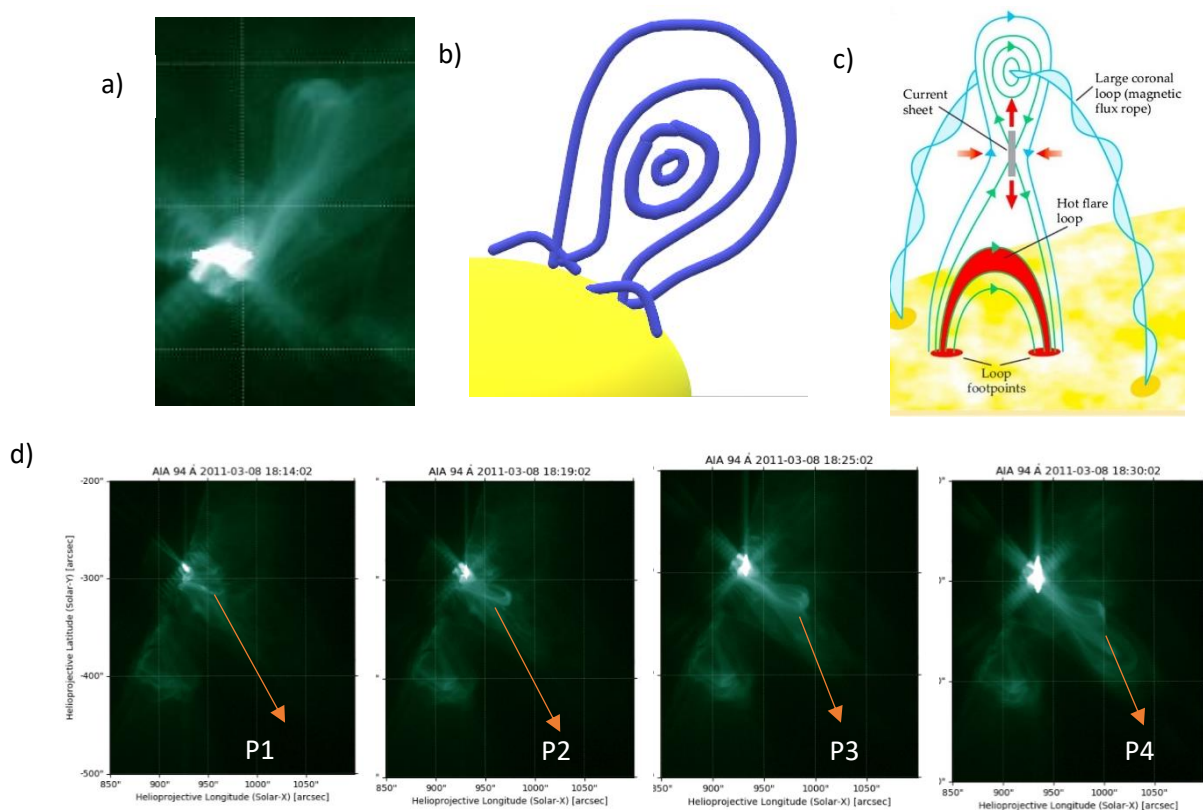


Figura 6.1. Cuerdas de flujo

a) Cuerda de flujo captada a las 18:19 UT en AIA/SDO 94. b) representación de la cuerda de flujo c) Modelo teórico. Fuente: (Holman, 2016). d) Elevación de la cuerda de flujo desde  $t=18:14$  UT hasta  $t=18:30$  UT, los puntos P1, P2, P3, P4, representan la posición de la cuerda de flujo sobre la fotosfera solar. Fuente: Elaboración propia.

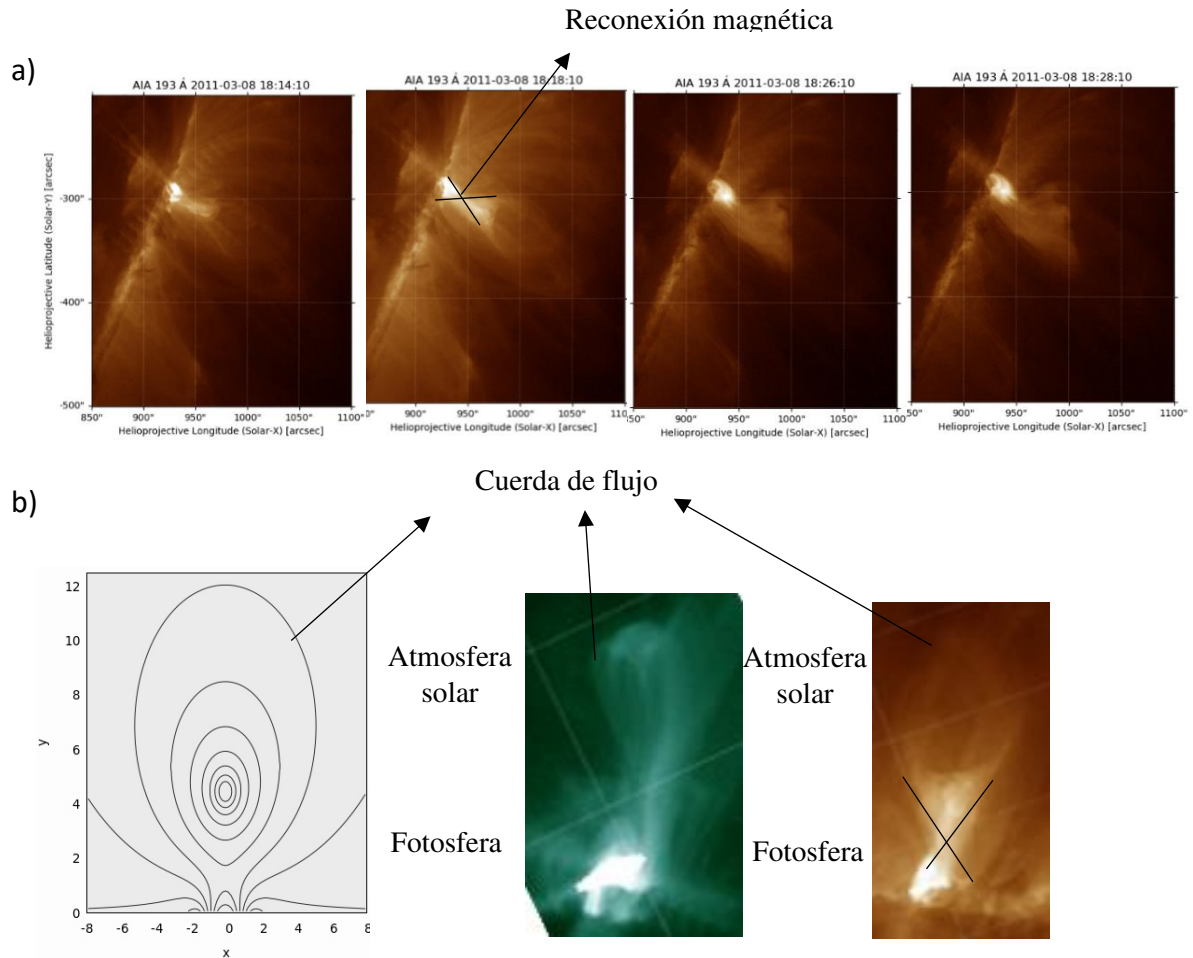


Figura 6.2. Cuerda de flujo y reconexión magnética.

a) Evolución de la cuerda de flujo en AIA /SDO 193Å en donde se observa una forma de X a las 18:18 /18:19 UT, que se asocian a presencia de reconexión magnética b) Cuerda de flujo simulada (izquierda) y real en AIA/SDO 193Å y 94 Å (derecha). Fuente: Elaboración propia y AIA/SDO.

## 6.2 Escenarios de simulación.

Ya que no se conoce, la razón desencadenante del aumento del tamaño de la cuerda de flujo y posterior reconexión magnética en la fulguración solar del 8 de marzo del 2011, se plantea en el modelo numérico MHD del capítulo 4, que la presencia de un flujo que emerge de la fotosfera con los diversos valores iniciales que se elijan para la presión y resistividad (Tabla 6.1), provocan la reconexión magnética y posterior elevación de la cuerda de flujo

Se planteo tres escenarios de simulación cuyo sistema de ecuaciones MHD resistivas se resolvieron numéricamente usando PLUTO.

Tabla 6.1.Diferentes valores de presión inicial y resistividad para cada escenario de simulación.

Escenario	Presión Inicial	Resistividad Inicial
1	$P = 0.5 \text{ Pa}$	$0.02 \text{ } \Omega.\text{m}$
2	$P = 1.5 \text{ Pa}$	$0.04 \text{ } \Omega.\text{m}$
3	$P = 2.0 \text{ Pa}$	$0.05 \text{ } \Omega.\text{m}$

*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.3 Análisis de la evolución de la cuerda de Flujo simulada en los tres escenarios de simulación.

En los tres escenarios de simulación de la cuerda de flujo, se presentan tres marcadas etapas (Tabla 6.2), coincidentes con los datos observacionales (Figura 6.17). En la primera etapa la cuerda de flujo se mantiene estable, es decir no se eleva ni sufre cambios. En la segunda etapa, las líneas de campo magnético de la cuerda de flujo alrededor del punto  $x(0,1.7)$  empiezan a acercarse formando una hoja de corriente produciendo la reconexión magnética. Finalmente, en la tercera etapa la cuerda de flujo se eleva con mayor rapidez dentro de la atmosfera solar. En las siguientes secciones se analizará en detalles las etapas mencionadas:

Tabla 6.2.Tabla. Etapas de la cuerda de Flujo.

Etapas	Primer escenario de simulación	Segundo escenario de simulación	Tercer escenario de simulación
Etapas Cuasi estática	$0 < t(s) < 130$	$0 < t(s) < 147$	$0 < t(s) < 160$
Etapas de Reconexión Magnética	$130 < t(s) < 230$	$147 < t(s) < 310$	$160 < t(s) < 323$
Etapas Post-Reconexión Magnética	$230 < t(s) < 960$	$310 < t(s) < 960$	$323 < t(s) < 960$

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 6.3.1 Etapa Cuasi Estática

En los tres escenarios de simulación, las dos fuerzas fundamentales que actúan sobre la cuerda de flujo en el eje Y son: gradiente de presión y la tensión magnética. El rol de la gradiente de presión (en dirección del eje Y +) es empujar a la cuerda de flujo fuera de la atmosfera, mientras

que la tensión magnética (en dirección del eje Y -) mantiene a la cuerda de flujo atada a la fotosfera solar. Cuando la diferencia entre ambas es pequeña, la cuerda de flujo se mantiene en equilibrio y estable, como ocurre en esta etapa.

En la etapa Cuasi estática, en  $t=0$  s, se genera el contacto entre el campo magnético emergente y la cuerda de flujo (6.3 b). Produciéndose una cancelación magnética, que desencadena una disminución de presión magnética (ver figura 6.12, 6.14) y un aumento de gradiente de presión gradual. A pesar de este comportamiento el equilibrio se mantiene, es decir la cuerda de flujo no presenta deformación en su estructura y la gradiente de presión magnética y la tensión magnética rigen por igual sobre la cuerda de flujo, por lo que se denomina esta etapa cuasi estática.

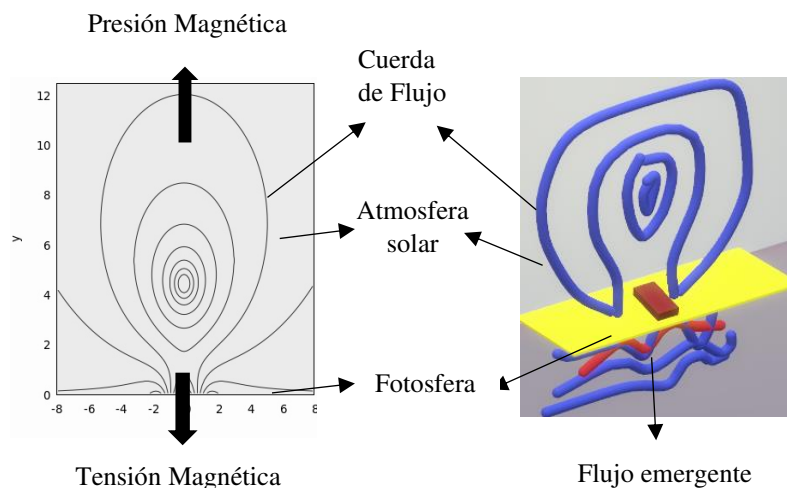


Figura 6.3. Cuerda de flujo simulada.

Figura. a) Cuerda de flujo en equilibrio b) Representación de la cuerda de flujo interactuando con el flujo magnético emergente dentro del canal del filamento. Fuente: Elaboración propia.

En cada escenario de simulación los intervalos para esta etapa son variados, siendo:  $0 < t(s) < 130$ ,  $0 < t(s) < 147$  y  $0 < t(s) < 160$  respectivamente. Esta variación se debe a los valores iniciales que se toman de la presión inicial y resistividad, debido a que, a mayor presión inicial y resistividad, mayor tiempo límite. Ya que al ser mayor la presión, esta demora más en disminuir, permitiendo que la gradiente de presión y la tensión magnética se mantenga más tiempo en equilibrio.

En la secuencia de imágenes (Figura 6.4), el **eje X** presenta la atmosfera solar y el **eje Y** la fotosfera solar, donde las líneas de campo magnético de la cuerda de flujo se muestran en negro y la degradación de colores representan la temperatura del plasma. Se puede notar que la estructura de la cuerda de flujo no cambia con el tiempo.

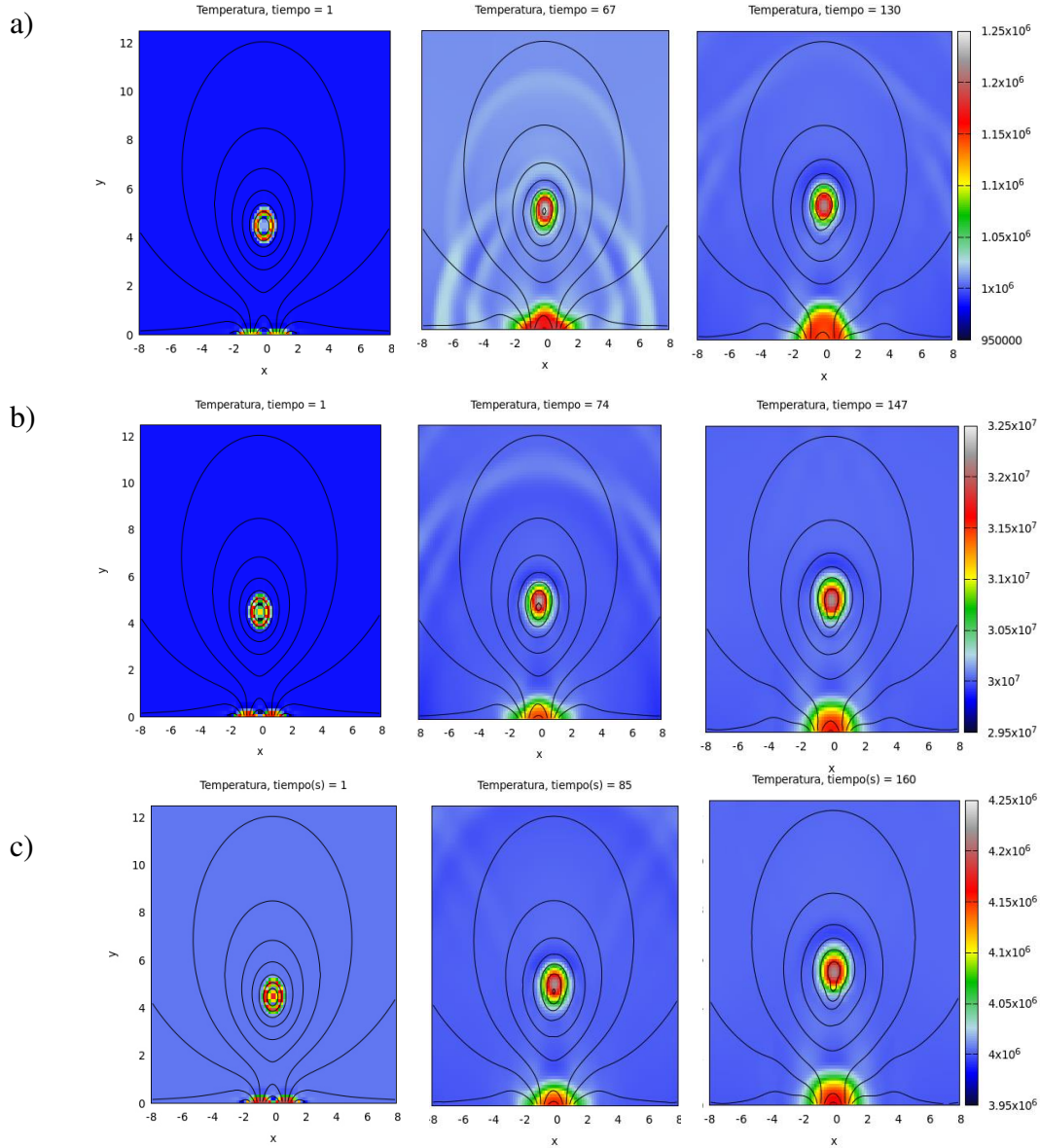


Figura 6.4. Etapa cuasi estática en los diferentes escenarios.

a) Primer escenario de simulación b) Segundo escenario de simulación c) Tercer escenario de simulación. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2 Etapa de reconexión magnética

En esta etapa a diferencia de la primera, los cambios estructurales de las líneas de campo magnético de la cuerda de flujo son notorios. En esta segunda etapa, la fuerza de tensión

magnética (en dirección del eje X) comienzan actuar sobre una región específica de la cuerda de flujo, llamada punto X (0,1.7), esta fuerza de tensión es generada por la gradiente de presión que se dirige hacia el punto X, producto de la disminución de presión, provocando que las líneas de campo magnético paralelas, en esa región empiecen a juntarse en este punto, formando una zona rectangular llamada **hoja de corriente eléctrica** (lugar donde fluye la corriente eléctrica y plasma). Una vez formada la hoja de corriente, la densidad de corriente eléctrica supera la densidad de corriente crítica, generando la aparición de resistividad (medida de la oposición de la corriente eléctrica dentro del plasma). Que permitirá que mejore la disipación de corriente en la hoja de corriente eléctrica, generando que las líneas de campo magnético paralelas se acerquen aún más provocando que la forma de la hoja de corriente cambia de rectangular a forma de reloj de arena (figura 6.5 b, c y d), hasta finalmente las líneas de campo magnético que la conforman se rompan y vuelvan a reconectarse.

En este punto el equilibrio empieza a perderse al disminuir gradualmente la presión general sobre el sistema (figura 6.12 y 6.14) superando la fuerza de tensión magnética, producto de la interacción de la cuerda de flujo con el flujo emergente ocurrido en la etapa cuasi estática.

En la etapa cuasi estática  $\eta = 0$ , cuando la densidad de corriente eléctrica crítica es mayor que densidad de corriente eléctrica, y se considera un campo magnético congelado es decir la estructura del campo magnético se preserva en el tiempo y se mueve con el fluido sin romperse o distorsionarse.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B \quad (89)$$

La ecuación que describe el movimiento del campo magnético en el plasma, es la ecuación de inducción (89). La misma está compuesta por el término convectivo y el difusivo, es importante mencionar que, en procesos como este, la difusión domina el campo, por lo que el término convectivo se elimina y los campos magnéticos sufren cambios drásticos en su topología como el caso de la reconexión magnética.



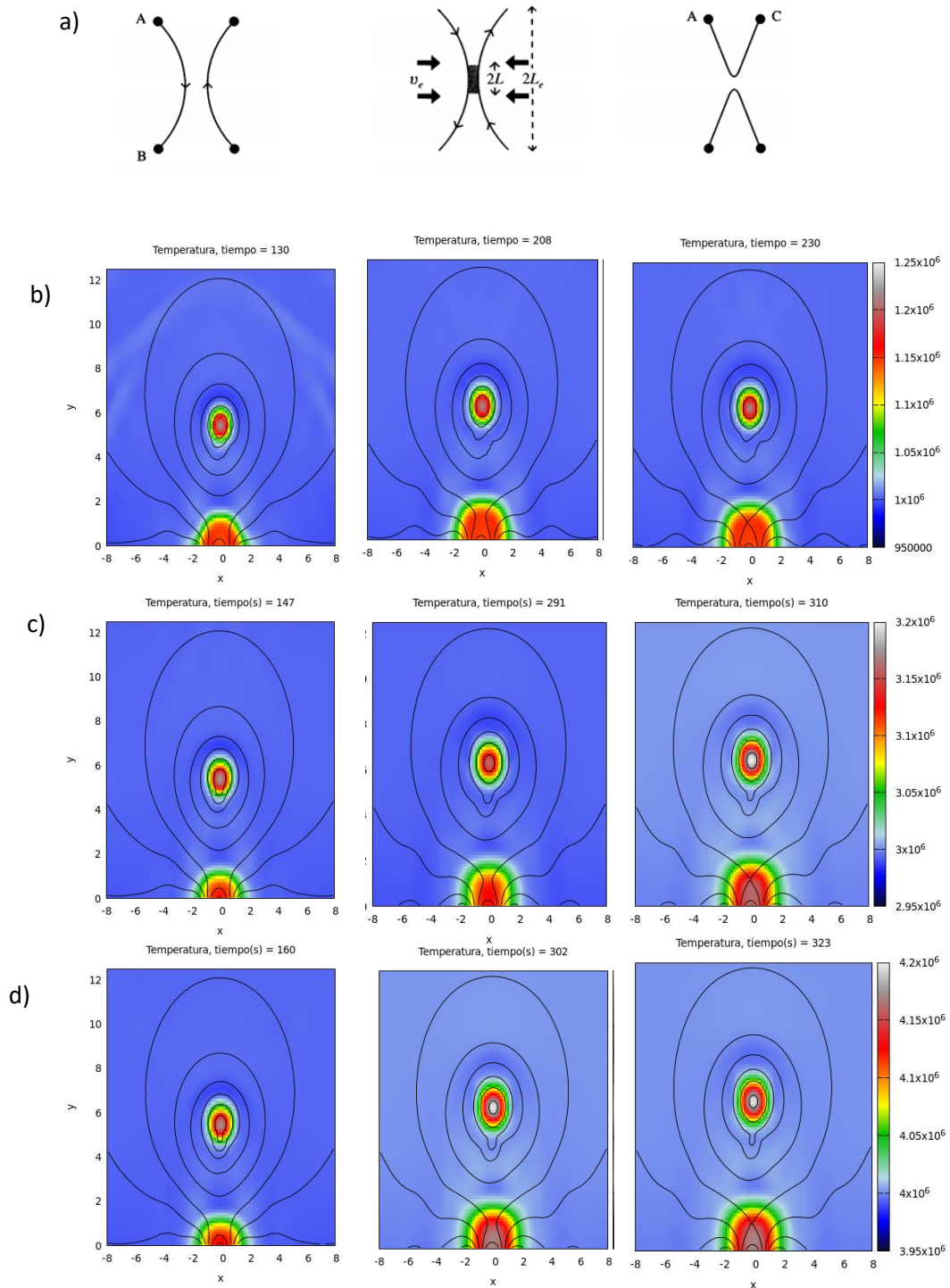


Figura 6.5.Reconexión magnética.

a) Esquema de reconexión magnética. Fuente: (Priest & Forbes, 2000). b) Etapa de reconexión magnética en Escenario 1 c) Etapa de reconexión magnética escenario 2 d) Etapa de reconexión magnética en Escenario 3. Fuente: Elaboración propia.

En la segunda etapa en los tres escenarios los valores de resistividad son  $0.02 \Omega.m$ ,  $0.04 \Omega.m$  y  $0.05 \Omega.m$  respectivamente, afectan el sistema, cuando la densidad de corriente eléctrica supera

la densidad de corriente crítica. Por lo que el campo magnético empieza a difundirse rompiéndose y volviéndose a reconectar en el punto X, ocurriendo la reconexión magnética, que es el proceso más importante dentro de la teoría de las fulguraciones solares, puesto que durante este fenómeno la topología de los campos magnéticos cambia y se liberan grandes cantidades de energía al acelerarse las partículas y el plasma.

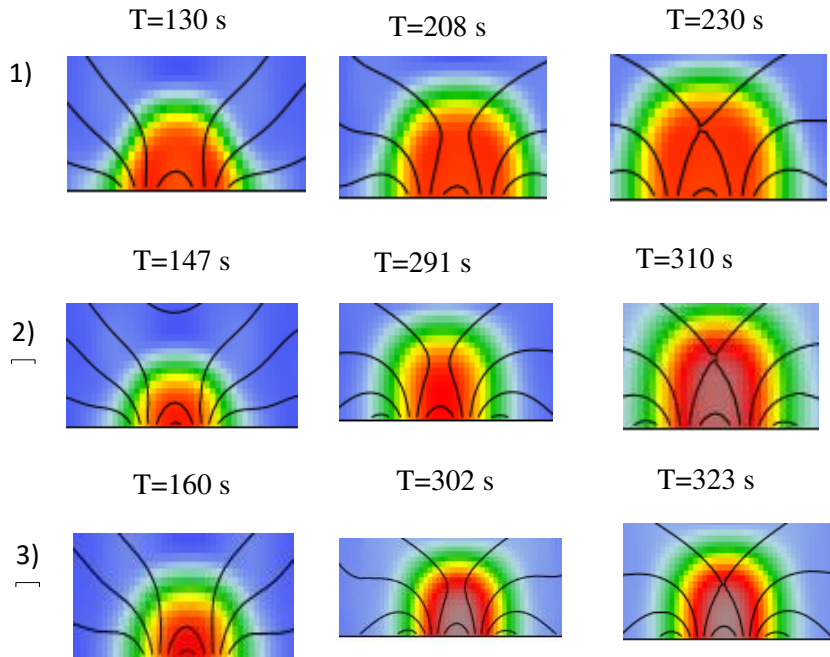


Figura 6.6. Escenarios 1, 2 y 3, Formación de hoja de corriente eléctrica.  
Fuente: Elaboración propia.

En nuestros tres escenarios de simulación, los tiempos de reconexión magnética (momento en el que sucede la reconexión magnética, (figura 6.5 y 6.6) fueron variados desde  $t_{rec}=230$  s,  $t_{rec}=310$  s hasta  $t_{rec}=323$  s, esto se debe principalmente a la presión inicial cuyos valores fueron: 0.5 Pa, 1.5 Pa y 2.0 Pa y los valores de resistividad descritos en la tabla 6.2.

La disminución de presión fue más lenta conforme incrementa el valor de la presión inicial, produciendo que la formación de la hoja de corriente eléctrica demore más. Por lo que la resistividad actúa tiempo después sobre la hoja de corriente, generando tiempos de reconexión mayores conforme se aumenta la presión inicial y la resistividad. La reconexión magnética ocurre más lentamente, y los campos magnéticos se difunden tiempo después. El rol de la



resistividad en el proceso, es de gran importancia puesto que al introducirse en las ecuaciones MHD, la resistividad se opone a las corrientes eléctricas que mantienen las líneas de campo magnético paralelas, permitiendo que se junten lo suficiente como para generar la reconexión.

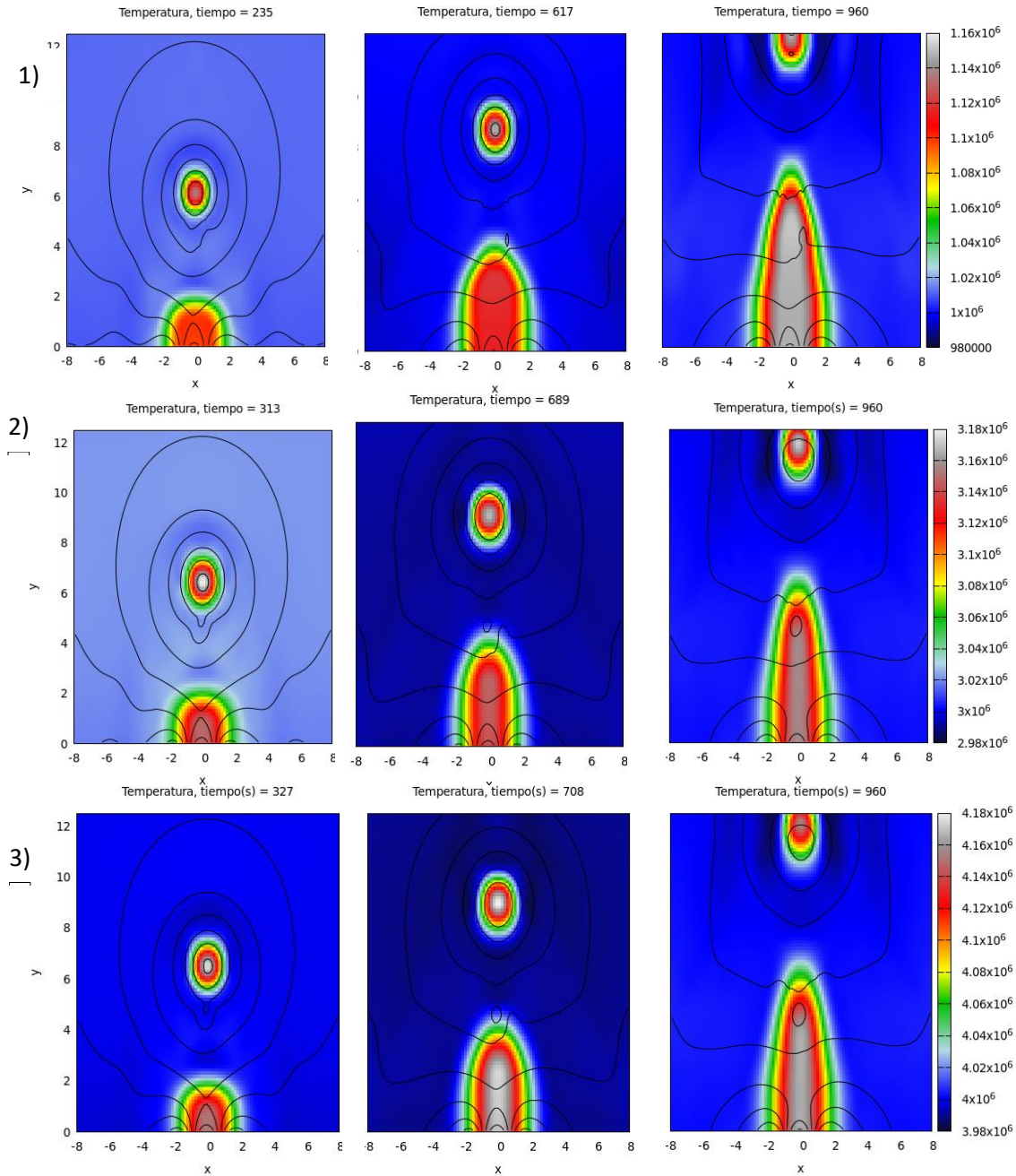


Figura 6.7. Etapa post reconexión en los tres escenarios de simulación 1,2 y 3.  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.3 Etapa de Post-Reconexión magnética

En las dos anteriores etapas en los tres escenarios de simulación, se observó la formación de la hoja de corriente y la reconexión magnética. Producto de esta se registran flujos de salida de reconexión, los cuales son plasma eyectado en dirección del eje Y, que impulsa a la cuerda de flujo hacia fuera de la atmosfera solar (Figura 6.7). En esta etapa el cambio de morfología en la cuerda de flujo es más notorio, se perdió el equilibrio de las fuerzas que actuaban sobre el **eje Y** la presión magnética y la tensión magnética. Siendo superada completamente esta última por la gradiente de presión, por lo que ya no existe fuerza que mantenga a la cuerda de flujo unida a la fotosfera solar y esta se eleva con facilidad.

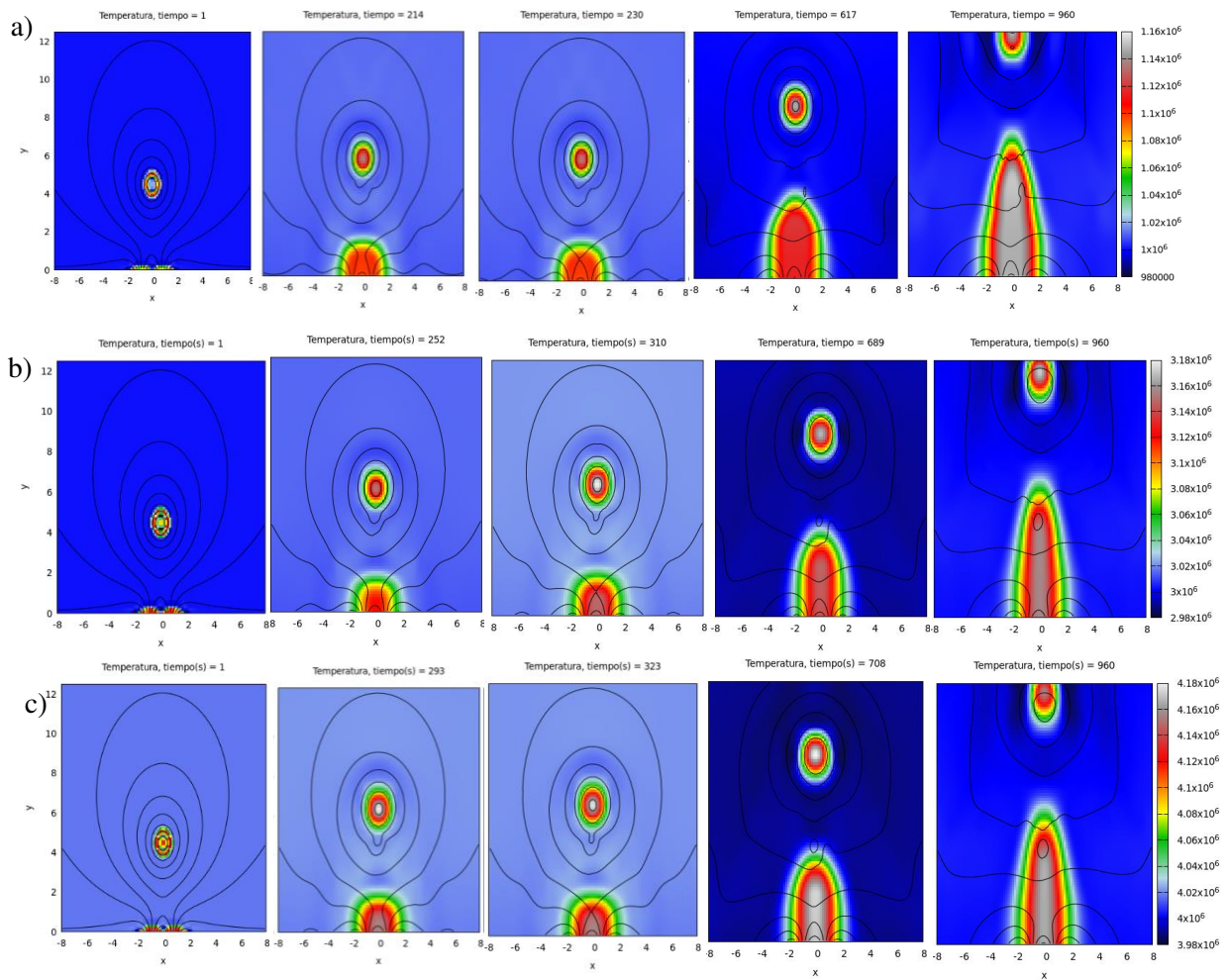


Figura 6.8. Evolución de la cuerda de flujo en los tres escenarios de simulación durante sus tres etapas.  
Fuente: Elaboración propia.

## 6.4 Análisis de la velocidad en la cuerda de Flujo simulada

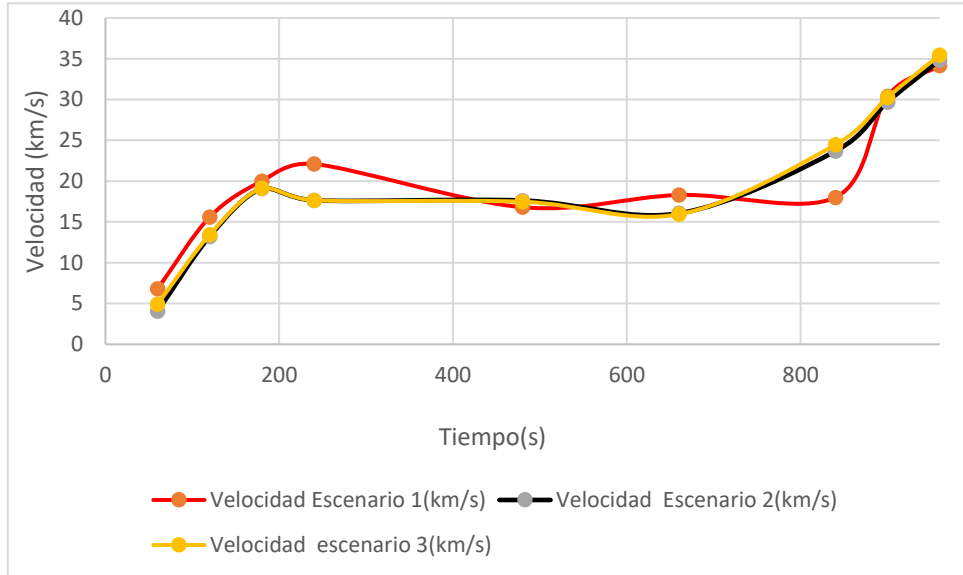


Figura 6.9. Comparación de Velocidades en los tres escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 6.9, en el intervalo de tiempo de  $0 \leq t(s) \leq 200$ , los tres escenarios de simulación poseen una fase de aceleración de velocidad. Este aumento de velocidad se debe a la disminución de presión, provocada por la interacción del campo magnético emergente (debajo de la fotosfera) con el campo magnético inicial de la cuerda de flujo en  $t=0$  s. En este intervalo de tiempo, se observa que los valores de la velocidad en el escenario 2 y 3 son cercanos en comparación a los valores en el escenario 1. Como por ejemplo sucede en  $t=60$  s, donde en los tres escenarios la velocidad es:  $6.8 \frac{km}{s}$ ,  $4.0484 \frac{km}{s}$  y  $4.9227 \frac{km}{s}$  respectivamente. También se tiene el mismo comportamiento en  $t=180$  s donde se registran velocidades de:  $20 \frac{km}{s}$ ,  $19.09 \frac{km}{s}$  y  $19.13 \frac{km}{s}$ . Este cambio se debe a los valores de presión inicial elegidos  $P_{01} = 0.5 Pa$ ,  $P_{02} = 1.5 Pa$  y  $P_{03} = 2.0 Pa$ , puesto que al ser la diferencia entre  $P_{02}$  y  $P_{03}$  pequeña, las velocidades son más cercanas. Otro detalle importante es que el escenario de simulación 1, presenta las velocidades más altas en este intervalo de tiempo.

En el intervalo de  $200 \leq t(s) \leq 800$ , la velocidad en los tres escenarios oscila entre:  $(16.733 \frac{km}{s} - 22.1 \frac{km}{s})$ ,  $(15.29 \frac{km}{s} - 19.83 \frac{km}{s})$  y  $(15.49 \frac{km}{s} - 20.74 \frac{km}{s})$ . Teniendo un rango de velocidad pequeña  $(5.367 \frac{km}{s}, 4.54 \frac{km}{s}$  y  $5.25 \frac{km}{s})$  en comparación al primer intervalo. Esto se debe a que el descenso de la presión no es abrupto, presentando poca variación temporal (figura 6.12 y 6.14), por lo que la variación temporal de la velocidad tiene el mismo comportamiento. Por otro lado, es importante mencionar que, durante este intervalo, ocurre la reconexión magnética en los tres escenarios de simulación, en  $t=230$  s,  $t=310$  s y  $t=323$ , registrándose velocidades de:  $18.4788 \frac{km}{s}$ ,  $15.7238 \frac{km}{s}$  y  $15.5892 \frac{km}{s}$ , respectivamente. Al igual que el primer intervalo los valores máximos de velocidad se registran en el primer escenario de simulación debido a la presión inicial seleccionada. El aumento de velocidad también es causado por la presencia de flujo de salida de reconexión magnética que impulsa a la cuerda de flujo por encima de la atmosfera solar, elevándola a una velocidad poco variable. Este comportamiento también se debe a que la gradiente de presión a superado la tensión magnética, produciéndose la desestabilización de la cuerda de flujo, generando que la tensión magnética (**eje Y-**) ya no pueda mantener a la cuerda de flujo en la fotosfera.

En el intervalo de  $800 \leq t(s) \leq 960$  se registra la segunda aceleración en los tres escenarios de velocidad. Oscilando entre:  $18.01 \frac{km}{s} - 34.14 \frac{km}{s}$ ,  $19.83 \frac{km}{s} - 34.82 \frac{km}{s}$ ,  $20.74 \frac{km}{s} - 35.46 \frac{km}{s}$ . Siendo  $\Delta v = 16.13 \frac{km}{s}$ ,  $14.99 \frac{km}{s}$  y  $14.72 \frac{km}{s}$  respectivamente. Esta aceleración se produce debido a que en este intervalo de tiempo se registran los valores mínimos de presión. Sumado a la pérdida de equilibrio total, puesto que la fuerza de tensión ya no puede oponerse a elevación de la cuerda de flujo como se describió en el párrafo anterior.

## 6.5 Velocidad en el punto X

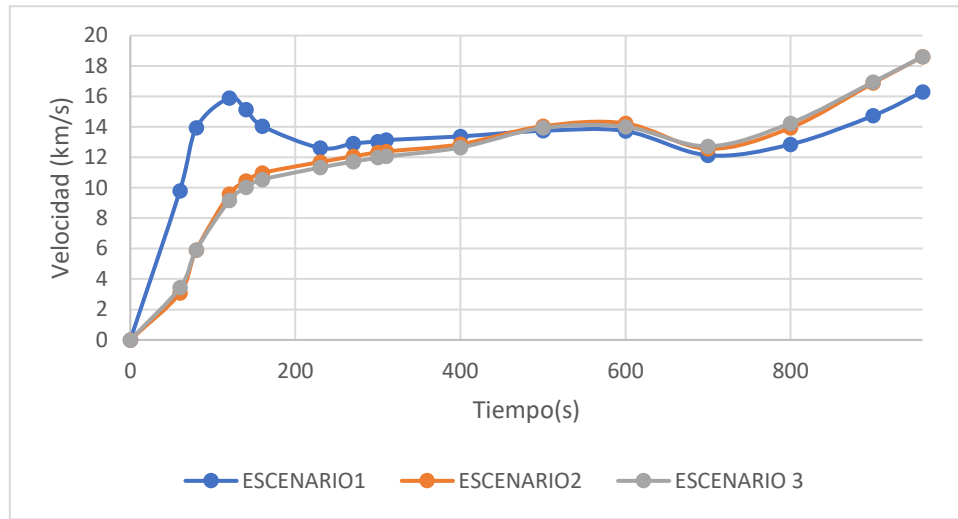


Figura 6.10.Velocidad dentro de la hoja de corriente punto X(0,1.7). Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la velocidad sobre el punto X (0,1.7) entre  $0 \leq t(s) \leq 960$ . Se observa tres marcadas fases en los intervalos:  $0 \leq t(s) \leq 200$ ,  $200 \leq t(s) \leq 800$  y  $800 \leq t(s) \leq 960$ .

Con respecto a la evolución temporal de las velocidades en los tres escenarios de simulación, la velocidad en los escenarios 2 y 3 poseen un coeficiente de correlación de 0.9985, mientras que las velocidades en los escenarios 1 y 2 un coeficiente de correlación de 0.7389, comportamiento que se repite entre las velocidades de los escenarios 1 y 3 con un coeficiente de correlación de 0.7273. Por lo que las velocidades 2 y 3 presentan una evolución temporal muy similar en comparación con el escenario 3. Esto se debe a las presiones iniciales elegidas  $P_{01} = 0.5 Pa$ ,  $P_{02} = 1.5 Pa$  y  $P_{03} = 2.0 Pa$ . Ya que al ser  $P_{03} - P_{02} = 0.5 Pa$ , una diferencia pequeña, las variaciones de velocidad también lo son. Un ejemplo de este comportamiento se encuentra en  $t=120$  s donde se registran 15.8924 km/s, 9.5752 km/s y 9.164 km/s.

En el intervalo de  $0 \leq t(s) \leq 200$ , la velocidad oscila entre,  $0-16.433 \frac{km}{s}$ ,  $0-11.3837 \frac{km}{s}$ ,  $0-11.0635 \frac{km}{s}$ . Durante este periodo en  $t=0$  s, el flujo emergente interactúa con la configuración

de la cuerda de flujo, y existe una aceleración de velocidad debido a la disminución marcada de presión pronunciada en los tres escenarios de simulación numérica. La gradiente de presión empieza a presionar las líneas de campo magnéticas paralelas de la cuerda de flujo, hacia el punto X formando la hoja de corriente.

Seguidamente entre  $200 \leq t(s) \leq 600$ , la gradiente de presión supera a la fuerza de tensión en dirección (Y-), ocurriendo la reconexión magnética en los tres escenarios de simulación, oscilando la velocidad entre:  $12.4294 \frac{km}{s}$ - $13.9313 \frac{km}{s}$ ,  $11.3444 \frac{km}{s}$ - $14.5671 \frac{km}{s}$  y  $11.0635 \frac{km}{s}$ - $14.3771 \frac{km}{s}$ . El rango de velocidad es pequeño, debido a que la presión en este tiempo se mantiene estable, es decir  $\Delta p$  es pequeño (figura 6.12 y 6.14). Durante este tiempo la velocidad en este punto es casi constante debido a que, las líneas de campo magnético alrededor del punto X son empujadas por la gradiente de presión hacia el punto X, activando la resistividad en esa región (la difusividad magnética aumenta). Registrando en los tiempos de reconexión ( $t_{rec_1} = 230 s$ ,  $t_{rec_2} = 310 s$  y  $t_{rec_3} = 323 s$ ) las velocidades en el punto X:  $12.6156 \frac{km}{s}$ ,  $12.3911 \frac{km}{s}$ ,  $12.142 \frac{km}{s}$  respectivamente. Luego de la reconexión, se registra un aumento de velocidad, producto de los flujos de salida de la reconexión magnética.

Posteriormente entre  $600 \leq t(s) \leq 800$ , ocurre una desaceleración de la velocidad en el punto X (figura 6.10) y en la cuerda de flujo (figura 6.9) una disminución en la densidad (figura 6.11), esto también se observa en los datos observacionales de la velocidad de la cuerda de flujo. Este comportamiento se debe a que los campos magnéticos ya no están siendo afectados por aceleración de las salidas de flujo de plasma durante la reconexión

En el intervalo de  $800 \leq t(s) \leq 960$ , se observa una segunda aceleración, donde las velocidades en el punto X, oscilan entre:  $12.8478 \frac{km}{s}$ - $16.3058 \frac{km}{s}$ ,  $13.9384 \frac{km}{s}$ - $18.6075 \frac{km}{s}$  y  $14.2451 \frac{km}{s}$ - $18.6094 \frac{km}{s}$ . La cuerda de flujo empieza a elevarse más rápido hacia afuera de la

atmosfera solar, producto que los campos magnéticos no pueden atarlo a la superficie, debido a que la fuerza de tensión magnética sobre la cuerda de flujo (**Dirección Y +**) es completamente superada por la fuerza de gradiente de Presión (**Dirección el eje Y-**).

## 6.6 Densidad

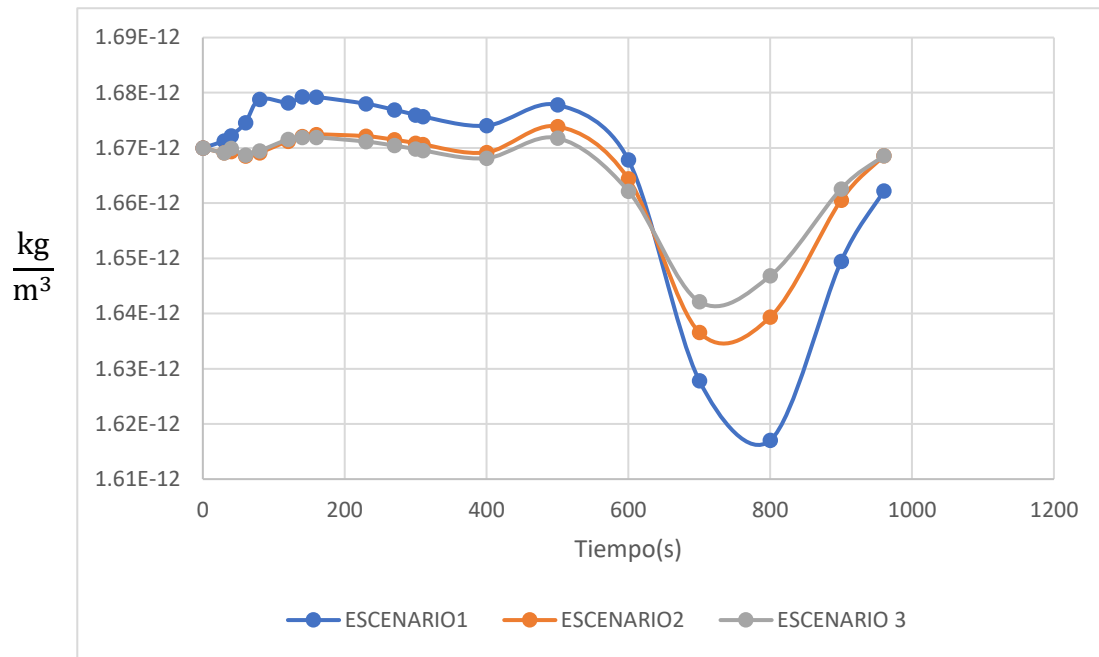


Figura 6.11.Densidad. Fuente: Elaboración propia.

En el primer escenario de simulación la densidad desde de  $t=0$  s hasta  $t=510$  s no sufre variaciones significativas fluctuando su valores entre  $\left\{1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3} \text{ y } 1.6781 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}\right\}$ . Desde  $t=510$ s hasta  $t=720$  s se observa una disminución considerable de  $1.6781 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  a  $1.62 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ , para luego aumentar su valor hasta  $1.66 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  en  $t=960$ s. En el segundo escenario de simulación entre  $0 < t < 510$  el comportamiento de la densidad es similar, él valor de la densidad promedio oscila entre  $\left\{1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3} \text{ y } 1.6743 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}\right\}$ . En el intervalo desde  $t=510$ s hasta  $t=720$  s se

registran los valores de:  $1.6743 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  y  $1.634 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  respectivamente, para incrementar su valor a  $1.668 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  en  $t=960$  s.

El tercer escenario de simulación repite el mismo comportamiento en cuanto a evolución de densidad de  $t=0$  s hasta  $t=510$  s fluctuando su valor entre  $1.67 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  y  $1.672 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$ .

En el intervalo entre  $t=510$  s hasta  $t=720$ , la densidad disminuye de  $1.67195 \frac{kg}{m^3}$  a  $1.640969 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$  hasta aumentar su valor a  $1.6685 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$

Como se mencionó líneas arriba en  $0 < t(s) < 510$  la variación de densidad no es muy considerable ( $< 0.1 \frac{kg}{m^3}$ ), ocurre dentro de la fase de cuasi estática y reconexión de la cuerda de flujo mientras que de  $t=510$  s a  $t=720$  s la densidad decrece, esto ocurre debido a que la cuerda está elevándose con mayor velocidad. Con respecto al periodo de tiempo desde  $t=720$  s hasta  $t=960$  s la densidad en los tres casos toma valores cercanos a la densidad promedio inicial dentro del sistema.

## 6.7 Presión de gas

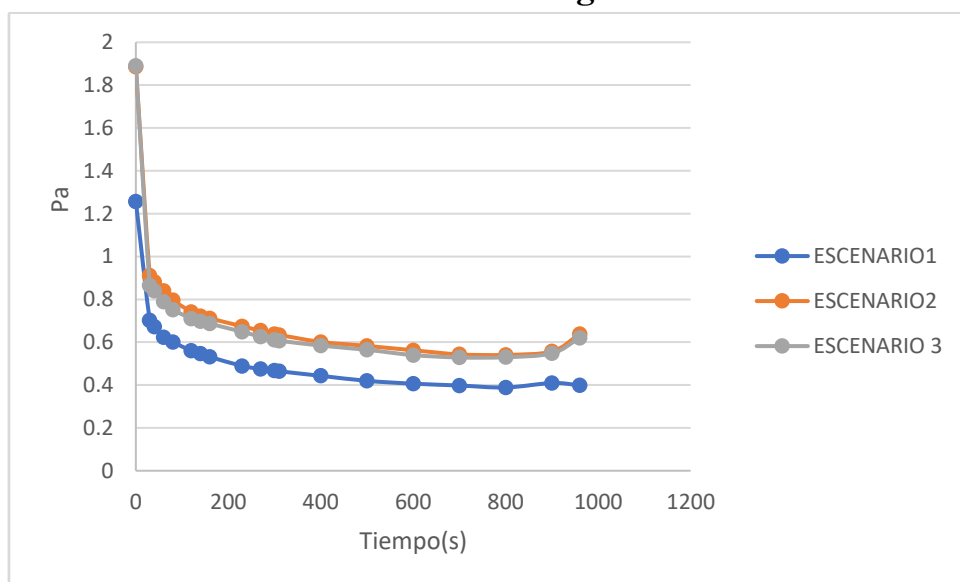


Figura 6.12.Presión. Fuente: Elaboración propia.



En los tres escenarios de simulación entre  $0 \leq t(s) \leq 200$  se registra un  $\Delta p = \{0,75 \text{ Pa}, 1.1 \text{ Pa} \text{ y } 1.2 \text{ Pa}\}$ . En el caso de la presión se observa que el  $\Delta p$  es negativo, puesto que la presión decrece en el tiempo. Esto se debe a que en  $t=0$  s, cuando el flujo emergente de la fotosfera solar interactúa con la cuerda de flujo. Esta interacción como se mencionó anteriormente, genera una disminución de presión y aumento de gradiente de presión magnética.

El desde el intervalo de  $t=0$  s hasta  $t=200$  s,  $\Delta p$  en el primer escenario es menor en comparación a los dos escenarios de simulación restante, debido a que la presión inicial es menor. Por esta razón se registraron los tiempos de reconexión del orden de  $\{230\text{s}, 310 \text{ s y } 323 \text{ s}\}$ . Ya que al ser mayor la presión, la gradiente de presión demoraba en dirigirse hacia el punto X, haciendo que tarde más tiempo en crearse la hoja de corriente, por lo que la resistividad empieza su efecto sobre la misma, tiempo después. Cabe mencionar que los valores de resistividad también afectaron los tiempos de reconexión en los tres escenarios de simulación.

En el intervalo entre  $200 \leq t(s) \leq 800$   $\Delta p = \{0.12 \text{ Pa}, 0.15 \text{ Pa}, 0.14 \text{ Pa}\}$ , a diferencia del primer intervalo en este, el  $\Delta p$  en los tres escenarios de simulación es mucho menor, debido a que la presión se estabilizo, empezando a superar la gradiente de presión a la fuerza de tensión magnética, provocando la pérdida del equilibrio en la cuerda de flujo.

Desde  $t=800$  hasta  $t=960$   $\Delta p = \{0.01 \text{ Pa}, 0.0969 \text{ Pa}, 0.0897 \text{ Pa}\}$  se registró un pequeño incremento del orden de 0,01 poco considerable en comparación a la evolución global de presión que tiende a decrecer. Durante este periodo la cuerda de flujo se eleva con mayor rapidez.

## 6.8 Temperatura

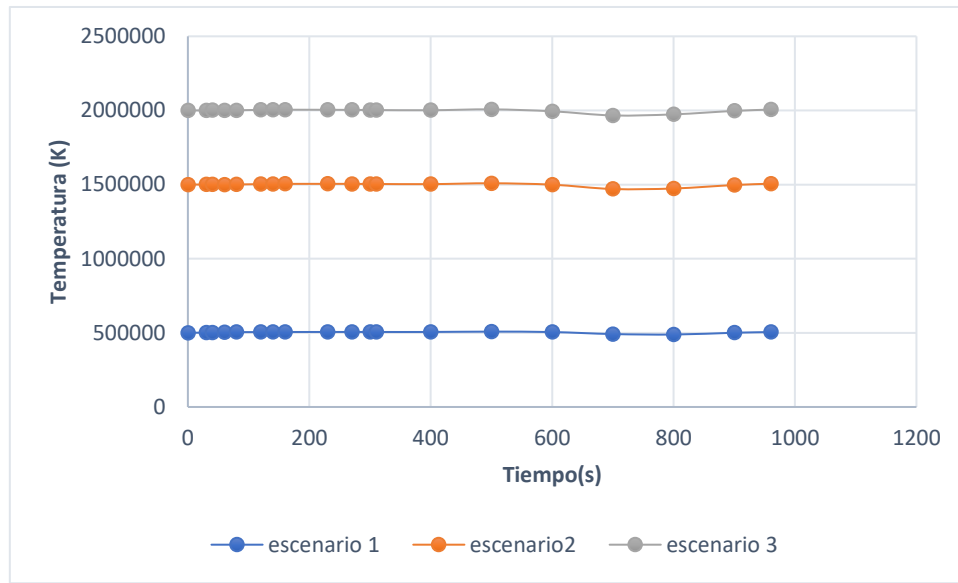


Figura 6.13.Evolución de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.3.Temperatura.

Intervalos de tiempo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
0	500 000 °K	1 500 000 °K	2000 000 °K
500	508 194.77 °K	1 508 807.37 °K	2 007 316.89 °K
780	487 423.3656 °K	1 469 903.2534 °K	1 969 639.598 °K
960	505 227.32 °K	1 505 775.536 °K	2 005 610.84 °K

*Fuente: Elaboración propia.*

En todos los escenarios de simulación (Tabla 6.3) entre el intervalo de  $0 < t(s) < 500$  la temperatura aumenta debido a que la presión disminuye drásticamente, durante la etapa de cuasi estática y de reconexión magnética, esta disminución permite la formación de hoja de corriente y posterior de reconexión magnética. En el intervalo de  $500 < t(s) < 780$ , la temperatura disminuye ligeramente su valor, debido a que la  $\Delta p$  es menor en comparación al primer intervalo. Finalmente, la temperatura entre  $780 < t(s) < 960$  incrementa ligeramente su valor, debido a las salidas de plasma de la etapa de post- reconexión magnética. Las temperaturas iniciales son mayores a mayor presión inicial elegida.

## 6.9 Presión Magnética

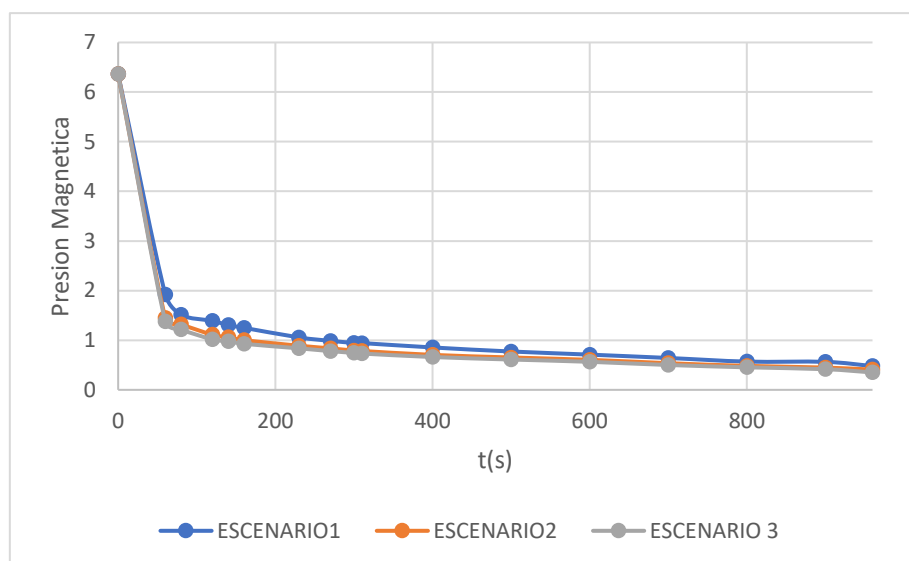


Figura 6.14.Presión Magnética. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.4. Presión magnética intervalos en los tres escenarios

Intervalos de tiempo(s)	Escenario 1( $\frac{dyna}{cm^2}$ )	Escenario 2( $\frac{dyna}{cm^2}$ )	Escenario 3 ( $\frac{dyna}{cm^2}$ )
0	6.3622	6.3622	6.3622
60	1.9206	1.4506	1.3789
200	1.1279	0.9366	0.8833
230	1.057	0.8893	0.8367
600	0.7097	0.6049	0.565
960	0.4801	0.4074	0.3512

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.5.Escenarios de simulación

Nro. de intervalo	Intervalo de tiempo	Escenario 1 $\Delta p$ ( $\frac{dyna}{cm^2}$ )	Escenario 2 $\Delta p$ ( $\frac{dyna}{cm^2}$ )	Escenario 3 $\Delta p$ ( $\frac{dyna}{cm^2}$ )
1	$0 \leq t(s) \leq 60$	4.4416	4.9116	4.9833
2	$60 \leq t(s) \leq 200$	0.7927	0.514	0.4956
3	$0 \leq t(s) \leq 200$	5.234	5.4256	5.479
4	$200 \leq t(s) \leq 600$	0.4182	0.3317	0.3183
5	$600 \leq t(s) \leq 960$	0.2296	0.1975	0.2138

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6.5, en el intervalo 1, la presión magnética disminuye abruptamente en los tres escenarios de simulación, este descenso se debe a la presencia de la cuerda de flujo interaccionando con el flujo que emerge de la fotosfera.

En el intervalo 2, en los escenarios de simulación, la presión magnética sigue decreciendo, pero en pequeñas proporciones, por lo tanto se puede señalar que entre el intervalo 1 y 3, la presión magnética disminuye en los tres escenarios. Durante estos periodos de tiempo se observa, que los  $\Delta p$  son menores conforme se considera presiones iniciales menores, aunque la diferencia entre los valores no es muy significativa, además la hoja de corriente eléctrica se empieza a formar, debido al aumento de la gradiente de presión, que empuja las líneas de campo magnético al punto X(0,1.7).

Continuando con el intervalo 4, se observa que la presión magnética disminuye, durante este intervalo ocurre la reconexión magnética, por esta razón la presión magnética no disminuye drásticamente en comparación al primer intervalo. Además, se observa que  $\Delta p$ , es mayor en el primer escenario en comparación al segundo y tercer escenario, esto puede suceder, por la presencia de la resistividad ya que el tiempo de reconexión aumenta con mayor resistividad.

Finalmente, en el intervalo 5, la presión magnética vuelve a decrecer siendo los  $\Delta p$ , más pequeños (en comparación al intervalo 3 y 4) debido a que la gradiente de presión magnética ha vencido por completo a la fuerza de tensión magnética y la presión se estabiliza, permitiendo que la cuerda de flujo salga expulsada de la atmosfera solar.

Todas las variaciones analizadas se deben a la presión de gas inicial elegida para cada escenario {0.5 Pa, 1.5 Pa y 2.0 Pa} y a los valores de resistividad iniciales, concluyendo que la presión de gas es inversamente proporcional a la presión magnética.

## 6.10 Cálculo de Error entre Datos simulados y observados

### 6.10.1 Error para velocidad de la cuerda de flujo

$$error = \left( \frac{valor\ real - valor\ simulado}{valor\ real} \right) \times 100$$

#### I) Primer escenario de simulación

Tabla 6.6. Velocidad observacional y Velocidad simulada.

Tiempo	Velocidad Observacional (km/s)	Velocidad Simulada (km/s)
60	24.1666667	6.8
120	12.0833333	15.6
180	12.0833333	20
240	12.0833333	22.1
480	15.1041667	16.8
660	12.0833333	18.3
840	12.0833333	18.01
900	36.25	30.4
960	11.6666667	34.14

*Fuente: Elaboración propia.*

Error promedio = 63.3188834 %

#### II) Segundo escenario de simulación

Tabla 6.7. Velocidad observacional y Velocidad simulada.

Tiempo	Velocidad Observacional (km/s)	Velocidad Simulada(km/s)
60	24.1666667	4.04841962
120	12.0833333	13.22467501
180	12.0833333	19.09290884
240	12.0833333	17.64462902
480	15.1041667	17.62000443
660	12.0833333	16.05505871
840	12.0833333	23.66785806
900	36.25	29.70111933
960	11.6666667	34.82005221

*Fuente: Elaboración propia.*

Error promedio=62.0721923 %

### III) Tercer escenario de simulación

Tabla 6.8. Velocidad observacional y Velocidad simulada.

Tiempo	Velocidad Observacional (km/s)	Velocidad Simulada(km/s)
60	24.1666667	4.922676026
120	12.0833333	13.434051
180	12.0833333	19.12676449
240	12.0833333	17.65095969
480	15.1041667	17.47674726
660	12.0833333	15.93894812
840	12.0833333	24.45989969
900	36.25	30.26460356
960	11.6666667	35.45725662

Fuente: Elaboración propia.

Error promedio=62.850025 %

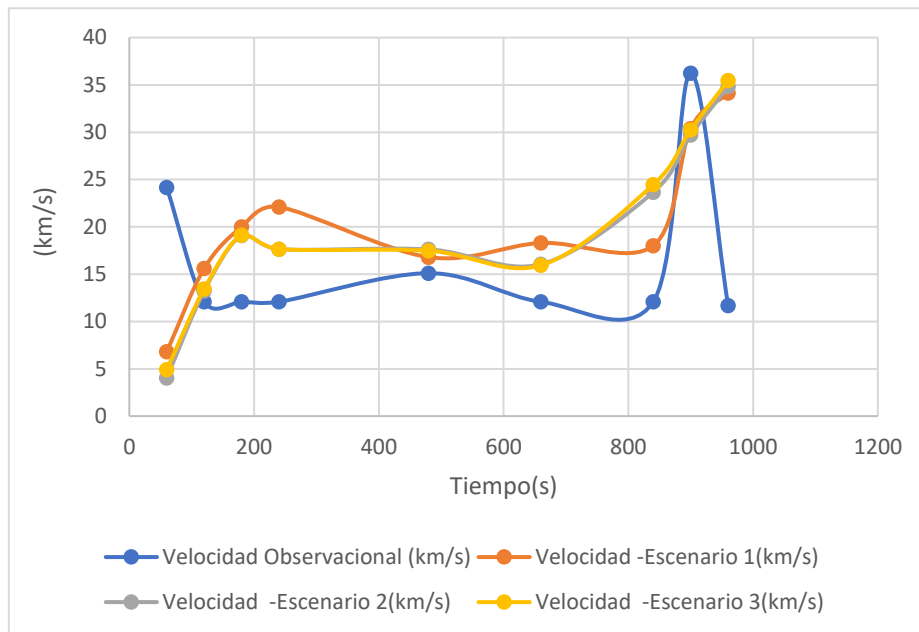


Figura 6.15.Comparación de velocidades. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 6.15, en los intervalos de  $120 \leq t(s) \leq 240$  (primer escenario) y  $120 \leq t(s) \leq 180$  (segundo y tercer escenario de simulación), ocurre una aceleración de velocidad al igual que los datos observacionales, producida por un descenso de presión en la simulación, durante estos intervalos de simulación se registra la formación de la hoja de corriente eléctrica y plasma en el punto X (0, 1.7), con la posterior reconexión magnética entre

$180 \leq t(s) \leq 480$ . Por lo tanto, en los tres escenarios de simulación en el intervalo de tiempo entre  $120 \leq t(s) \leq 480$ , el error calculado es: 47.1862069 %, 32.5342409 % y 32.8134613 %. Entre  $480 \leq t(s) \leq 660$ , la primera, segunda y tercera simulación, registran errores de 31.34 %, 24.76% y 23.81%, ocurriendo una desaceleración en los escenarios (2 y 3), coincidente con los datos observacionales, por esta razón los errores (2 y 3) son menores en comparación al error en el primer escenario de simulación donde la velocidad presenta una aceleración. El descenso de la velocidad se debe a que la  $\Delta p$  es menor y estable, evitando una nueva aceleración. Durante esta fase los flujos de salida de reconexión magnética permiten que la cuerda de flujo en los escenarios de simulación y los datos observacionales se eleven en la atmósfera solar

Seguidamente entre  $660 \leq t(s) \leq 900$ , el error calculado fue 38.8781609 %, 48.9357527 % y 50.2822435%, durante este intervalo los tres escenarios de simulación y los datos observacionales presentan una fase de aceleración coincidente, la cuerda de flujo se eleva con mayor velocidad, esta aceleración ocurre, ya que en este punto la fuerza de tensión (eje Y-) ya no puede retener a la cuerda de flujo en la atmósfera solar.

Entre  $900 \leq t(s) \leq 960$ , ocurre una disminución de velocidad en los datos observacionales sin embargo en los datos de simulación la cuerda de flujo sigue acelerando. La desaceleración en los datos observaciones se puede deber a diferentes causas como:

- La intervención de la gravedad, la cual puede frenar la velocidad de ascenso de la cuerda de flujo en las observaciones (AIA/SDO).

La presencia de otros campos magnéticos.

### 6.10.2 Error en tiempos de reconexión

Después que se forma la hoja de corriente, ocurre la reconexión magnética en los tres escenarios de simulación en los tiempos (tabla 6.9, Figura 6.16 a): 230 s, 310 s y 323 s, mientras que en los datos observacionales el tiempo de reconexión fluctúa entre  $220 \leq t \leq 300$  s (18:18 UT-18:19 UT). El tiempo de reconexión del primer escenario, se encuentra dentro de los límites establecidos usando AIA/SDO, mientras que el segundo y tercer escenarios de simulación, presentan un error de 0 %, 3.3 % y 7.67 % con respecto al límite superior. La diferencia en los tiempos de reconexión magnética, se debe a las presiones iniciales y resistividad establecidas, ya que, a mayor presión inicial y resistividad, la hoja de corriente demora en formarse y la disipación de corriente eléctrica es más lenta.

Tabla 6.9. Tiempos de reconexión magnética.

Escenarios	Tiempo de reconexión(s)	
Observacional	$220 < t_{rec} < 300$	Error
Primer escenario de simulación	230	(Dentro del intervalo)
Segundo escenario de simulación	310	3.3 %
Tercer escenario de simulación	323	7.67 %

Fuente: Elaboración propia.

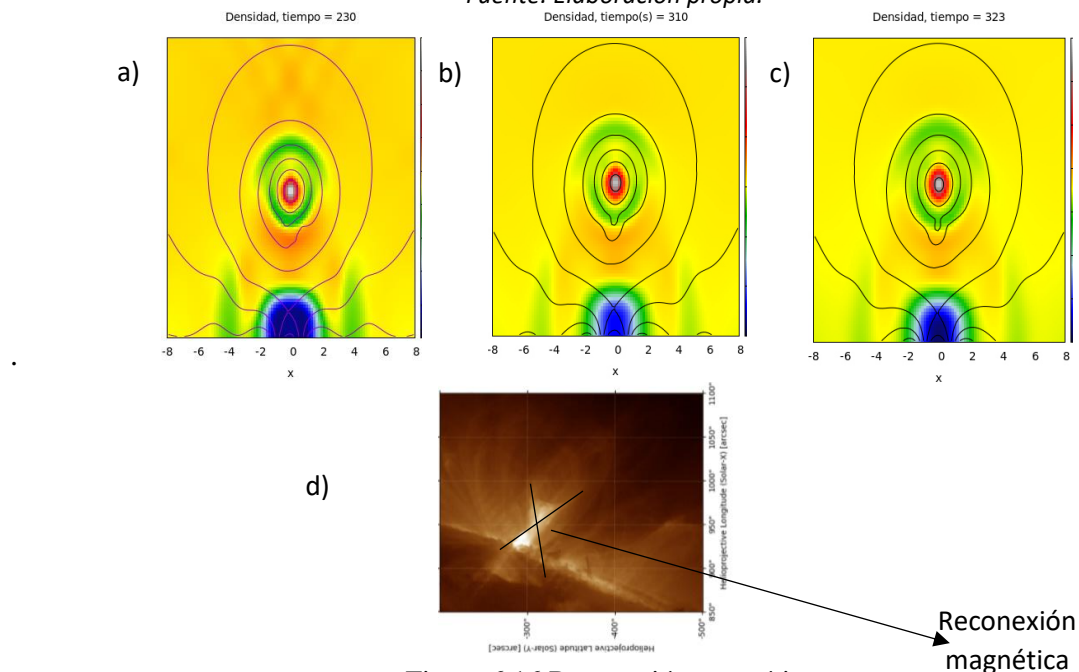


Figura 6.16. Reconexión magnética.

a) Reconexión magnética tres escenarios de simulación b) Reconexión magnética en los datos observado aproximadamente entre (18:18 UT-18:19 UT) en la región activa NOAA-11165 con AIA/SDO 193 Å. Fuente: AIA/SDO.



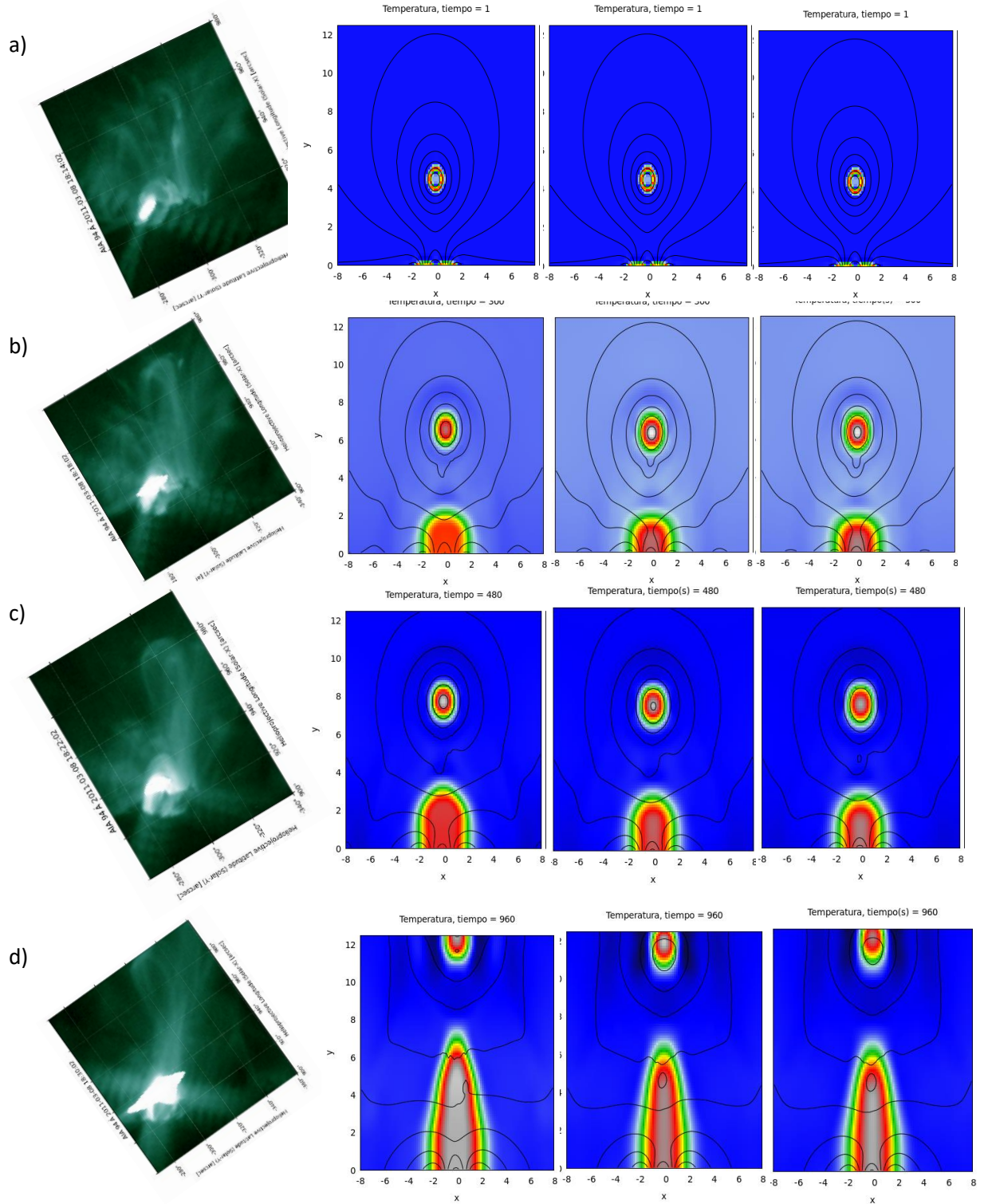


Figura 6.17. Comparación de cuerda de flujo observada y simulada

- a) Tiempo 1s: Cuerda de flujo observada (18:14:02 UT) y simulada en el escenario 1,2 y3.
- b) Tiempo 300 s: Cuerda de flujo observada (18:18 UT) y simulada en el escenario 1,2 y3.
- c) Tiempo 480 s: Cuerda de flujo observada (18:22 UT) y simulada en el escenario 1,2 y3.
- d) Tiempo 960 s: Cuerda de flujo observada (18:30UT) y simulada en el escenario 1,2 y3.

Fuente: AIA/SDO y Elaboración propia

## 6.11 Validación de la hipótesis

Con respecto a la hipótesis, se confirmó que en los tres escenarios de simulación, la presencia del flujo magnético emergente (estructura magnética) que interactúa con los campos magnéticos la prominencia (cuerda de flujo) y los diversos valores que se consideraron para las condiciones iniciales de la presión y resistividad, si **lograron** desencadenar el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 (reconexión magnética). Las tres simulaciones logran replicar la reconexión magnética (Figura 6.16a) y la elevación de la cuerda de flujo en la atmosfera solar como ocurre en los datos reales extraídos de AIA/SDO (figura 6.17, sección 6.3). Llegando a obtenerse errores pequeños de tiempos de reconexión en las simulaciones, con respecto al de intervalo observacional (0%, 3.3 y 7.7 %).

Por otro lado, los errores porcentuales promedio de la velocidad son elevados, por lo que se deduce que la morfología y la reconexión magnética de la cuerda de flujo pueden ser explicados y replicados con la hipótesis planteada, para el caso de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4, sin embargo la velocidad no logro ser completamente replicada, a pesar de que los datos observacionales y simulados fueron coincidentes en sus tres etapas (aceleración, desaceleración y segunda aceleración), los errores calculados fueron mayores al 10 %.

Como se observa en las tablas 6.6 ,6.7 y 6.8, el error general de la evolución temporal de velocidad en las simulaciones con respecto a la velocidad observacional extraída de los datos de SDO/AIA, es del orden de: 63.32 %, 62.07 % y 62.85 %. Estos valores de error elevados se deben a las siguientes condiciones:

- **Sobre los datos observacionales de AIA/SDO.**

Si bien es cierto que los datos de AIA/SDO, brindan información amplia para el objetivo de estudio, no se obtuvo información más detallada del fenómeno a menor escala < 5000 km y en 3D, imposibilitando observar el comportamiento del plasma producto de

otras interacciones con los campos magnéticos, que pueden afectar la evolución cinemática del fluido a pequeña escala y en 3D. A pesar de este detalle, con la información extraída del telescopio se logró reproducir la evolución global de la cuerda de flujo (la cual ocurre a grandes escalas), con un margen de error muy pequeño.

- **Sobre el rol de la turbulencia y la conducción térmica.**

Una de las razones del alto error encontrado en la evolución cinemática del sistema, puede deberse a que no se consideró la presencia de la turbulencia.

La turbulencia se agrega como termino fuente a la ecuación de energía, por lo que la presencia de esta inestabilidad afecta considerablemente el comportamiento cinemático del plasma, produciendo que la velocidad aceleré o fluctué en las zonas donde se crean los vórtices. La turbulencia es muy común en el sol, pero debido a que la escala en la que se presenta es muy pequeña, no se logró captar su efecto en los datos tomados para la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011, por lo que no fue simulada, siendo una de las causantes del alto error cinemático; pero no morfológico debido a que la turbulencia no es medible a grandes escalas en nuestras observaciones, por lo que la evolución morfológica fue replicada con éxito.

Otra razón del alto error registrado en la velocidad, es que no se consideró, presencia de la conducción térmica en las ecuaciones MHD. La conducción térmica afecta indirectamente el desarrollo de la velocidad cuando es agregada en el lado derecho la ecuación de energía, sumándose al trabajo para expandir o comprimir el elemento fluido.

- **Sobre el rol de la presión y los valores promedios del plasma.**

Las condiciones iniciales del plasma como: presión, densidad y temperatura son valores promedios en la región a simular, debido al gran tamaño del área de estudio, generado

que los resultados no reflejen por completo el desarrollo real de la velocidad en el tiempo.

- **Sobre el rol de la gravedad.**

No se consideró la presencia de la gravedad, debido a que existen otras fuerzas dominantes (a grandes escalas) que actúan sobre el fluido en comparación a las fuerzas gravitatorias del área de estudio.

Para la evolución de la velocidad en el intervalo entre  $0 \leq t(s) \leq 900$ , los errores son relativamente bajos (sección 6.10.1), obteniéndose en la simulación un comportamiento cinemático muy similar al observacional. En el intervalo, entre  $900 \leq t(s) \leq 960$ , se presenta una aceleración en los datos simulados, contraria a los datos observacionales, donde se aprecia una desaceleración, motivo por el cual el error es considerablemente alto. Esta desaceleración en la velocidad observacional, puede explicarse, debido a la presencia de la turbulencia no observable, como también la presencia de la gravedad.

- **Acerca de la resistividad uniforme.**

Se asumió que la resistividad es uniforme en toda la hoja de corriente, pero en las observaciones la resistividad puede ser variable en diferentes regiones de la hoja de corriente, aunque debido a las limitaciones observacionales no se logró comprobar este comportamiento, por lo que se decidió asumir una resistividad uniforme.

## 7 . Capítulo VII: Conclusiones

- Se logro determinar la estructura magnética y las condiciones iniciales en el plasma que desencadenan el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011. Los cuales son la presencia de un flujo emergente (estructura magnética) y las condiciones iniciales de presión y resistividad (Tabla 7.1), en los tres escenarios de simulación que desencadenaron la liberación de energía (reconexión magnética en la cuerda de flujo) de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011.

Tabla 7.1. Valores de presión y resistividad inicial en los tres escenarios de simulación.

Escenario	Presión Inicial	Resistividad Inicial
1	0.5 Pa	0.02 $\Omega$ .m
2	1.5 Pa	0.04 $\Omega$ .m
3	2.0 Pa	0.05 $\Omega$ .m

*Fuente: Elaboración propia.*

Implementando las condiciones iniciales mencionadas anteriormente, junto con las condiciones iniciales generales de plasma y de campo magnético desarrolladas en el capítulo 4, se consiguió reproducir la evolución temporal de la cuerda de flujo observada de los datos AIA/SDO, en los tres escenarios (Figura 6.17). Detectando tres marcadas etapas: cuasi estática, reconexión magnética y post reconexión magnética (tabla 6.2). En la primera etapa (Figura 6.4) la cuerda de flujo se desestabiliza (al interactuar con el flujo emergente) y se empieza a formar una hoja de corriente, en la segunda etapa (Figura 6.5 y 6.6) ocurre la liberación de energía de la fulguración solar M4.4 y en la tercera etapa (Figura 6.7) a la cuerda se eleva a la parte superior de la atmosfera solar. Observando la segunda etapa de evolución de la cuerda de flujo, la variación del tiempo de formación completa de la hoja de corriente en los tres escenarios de simulación  $t=208$  s, 291 s y 302 s, se debió a las diferentes presiones iniciales planteadas. Ya que la presión como se ve en las figuras (6.12 y 6.14) desde de  $t=0$  s empieza a decrecer con rapidez y aumenta la gradiente de presión magnética, dirigiéndose hacia el punto X (0, 1.7) y

presionando las líneas de campo magnético a su alrededor, provocando la formación de la hoja de corriente (Figura 6.6 y 6.7). Por lo que al ser mayor la presión inicial, la presión magnética demora en decrecer, hasta poder superar la fuerza de tensión magnética, lo que permite la creación de la hoja de corriente.

Continuando con la observación de la segunda etapa, también se identificó que los tiempos de reconexión magnética en los tres escenarios de simulación fueron: 230 s, 310 s y 323 s, teniendo un error de 3.3 % y 7.7 %, con respecto al intervalo de tiempo observacional (220 s-300 s), por lo que a mayor presión inicial y resistividad mayor tiempo de reconexión magnética. Ya que la cuerda de flujo tarda en perder el equilibrio, en vista que la gradiente de presión supera la fuerza de tensión contraría tiempo después, generando que la resistividad ingrese tardíamente cuando  $(j(\text{densidad de corriente}) \geq j_c(\text{densidad de corriente crítica}))$ , asimismo, a menor resistividad, más rápida es la difusión en la hoja de corriente, puesto que las resistividades en los tres escenarios de simulación fueron: 0.02  $\Omega.m$ , 0.04  $\Omega.m$  y 0.05  $\Omega.m$ .

- Se definió los criterios para la selección de la fulguración solar de estudio (capítulo 3), dividiéndolo en dos pasos, el primero consistió en elegir la región de estudio solar, utilizando los datos de NOAA del (2010-2019) (criterios 1,2,3 y 4) y analizándolo con Python, de la siguiente manera:
  - Criterio 1: Por Intensidad de evento en las regiones solares, se seleccionaron las regiones con presencia de eventos X y M.
  - Criterio 2: Tiempo de ocurrencia entre eventos registrados, fue de 2h, para una mejor identificación y que los eventos fueran  $< 6$  en las regiones de estudio.
  - Criterio 3: Intervalo de tiempo del evento, se seleccionaron regiones cuyos eventos ocurrieron entre las (14:00 UT-22:00UT), hora solar peruana.

- Criterio 4: Posición en el sol de la región activa, se seleccionaron regiones ubicadas en el borde solar.

En el paso 2, se describió la región solar NOAA 11165, anteriormente seleccionada, encontrando dos fulguraciones solares (M4.4 Y M1.4), describiéndolas y seleccionando a la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011 como objeto de estudio.

- Se encontró dos características observacionales que describen el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011, las cuales fueron:
  - **La presencia de la cuerda de flujo de la prominencia:** Usando los datos de AIA/SDO, en las bandas 131 Å, 94,171 Å , se logró observar y describir la evolución cinemática de la cuerda de flujo (18:14 UT-18:30 UT) (sección 3.5.5) asociada a la reconexión magnética.
  - **La presencia de la reconexión magnética:** Usando los datos de AIA/SDO, en la banda 304 Å , se observó la reconexión magnética en la cuerda de flujo entre las 18:18 UT-18:19 UT (sección 3.5.3 y figura 6.2).
- Se estudio las propiedades del plasma que se obtuvieron de la simulación numérica las cuales fueron: presión, densidad, temperatura y velocidad, para la descripción de la dinámica del fluido del inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar de estudio.

La presión magnética y de gas, decrece en los tres escenarios de simulación (Figura 6.12 y 6.14), producto de la interacción del flujo emergente con la cuerda de flujo, entre  $0 \leq t(s) \leq 60$ , el descenso de presión es abrupta, lo que permite la formación de la hoja de corriente (Figura 6.6), debido a que el equilibrio se pierde cuando la presión magnética  $>$  la fuerza de tensión.

La densidad no sufre variaciones significativas (figura 6.11), en la secuencia de imágenes (Figura 5.7, 5.22 y 5.33) se observa que la distribución de densidad en la cuerda de flujo se localiza en el punto (0, 4) y sobre la fotosfera, debido a que en esta posición se ubica la prominencia y el plasma en la superficie solar.

Sobre el comportamiento de la temperatura (figura 6.13), encontramos que a mayor presión inicial mayor temperatura, además el modelo no considera conducción térmica por lo que la distribución de temperaturas (Figuras 5.8, 5.23 y 5.34) en la cuerda de flujo es casi uniforme, encontrándose la mayor temperatura en la región central de la cuerda de flujo, la hoja de corriente y sobre la superficie solar.

La velocidad observacional (Figura 6.15, Tabla 7.2) AIA/SDO 94, presentan marcadas fases: primera aceleración  $120 \leq t(s) \leq 480$ , desaceleración  $480 \leq t(s) \leq 660$ , segunda aceleración  $660 \leq t(s) \leq 900$  y disminución brusca  $900 \leq t(s) \leq 960$ . Este comportamiento también se observa en los tres escenarios de simulación, exceptuando por la última etapa.

Tabla 7.2. Errores en los escenarios.

Escenarios	Intervalo	Porcentaje de error Escenario 1	Porcentaje de error Escenario 2	Porcentaje de error Escenario 3
1	$120 \leq t(s) \leq 180$	47.31 %	32.73 %	34.73
2	$480 \leq t(s) \leq 660$	31.34 %	24.76	23.81
3	$660 \leq t(s) \leq 900$	38.878	48.9358	50.2822

*Fuente: Elaboración propia.*

Sobre la tabla 7.2, en el intervalo 1 de simulación en los tres escenarios y los datos observacionales ocurre una aceleración debido al descenso de la presión. En el intervalo 2, el escenario de simulación 1 y 2, al igual que los datos observacionales presentan una fase desaceleración, que se produce debido a que el efecto del flujo de salida de reconexión magnética sobre la cuerda de flujo ha menguado al separarse la misma del punto X(0,1.7). Además, como se observa en la figura 6.12 y 6.14, la presión se



mantiene estable y disminuye con respecto al primer tramo por lo que la velocidad disminuye. Seguidamente en el intervalo 3, la cuerda de flujo simulada y observada, presenta una nueva aceleración debido a que la tensión magnética ya no puede mantener a la cuerda de flujo atada a la fotosfera solar y la cuerda de flujo no tiene fuerza que se oponga a su movimiento, elevándose a la parte superior de la atmosfera solar (Figura 6.7).

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y el análisis desarrollado a cada escenario de simulación, se pudo validar la hipótesis planteada, logrado que el flujo magnético emergente (estructura magnética) que interactúa con los campos magnéticos de la prominencia (cuerda de flujo) y los diversos valores que se consideran para las condiciones iniciales de la presión y resistividad (Tabla 7.1 y capítulo 4), desencadenen el inicio de la etapa de liberación de energía de la fulguración solar M4.4 del 8 de marzo del 2011. Por lo tanto con el modelo numérico construido se replica la evolución cinemática de la cuerda de flujo observada con AIA/SDO (sección 6.3 ) y la reconexión magnética (etapa de liberación de energía), obteniendo errores de tiempos de reconexión bajos, pero errores altos entre la velocidad real y la observacional (Tabla 7.2), este comportamiento se generaría por las siguientes razones: limitaciones instrumentales (2D), no se consideró la turbulencia, conducción térmica, gravedad y se consideró condiciones iniciales promedios del plasma y resistividad uniforme.

## **8 . Anexos**

## Anexo A: Tablas de regiones solares y eventos por año

a) Tablas para el Criterio 2: Tiempo de ocurrencia entre eventos registrados.

Tabla 8.1. Años 2010, 2011 y 2012.

2010		2011		2012	
Nombre de región activa	Numero	Nombre de región activa	Numero	Nombre de región activa	Numero
11041	6	11149	1	11401	3
11045	8	11153	1	11402	3
11046	1	11158	6	11410	1
11069	1	11161	1	11429	16
11081	1	11162	3	11430	1
11079	1	11163	1	11432	2
11093	1	11164	5	11445	1
11112	1	11165	6	11461	1
11121	3	11166	5	11466	1
		11171	1	11476	11
		11169	2	11471	1
		11176	3	11496	1
		11190	1	11494	1
		11195	2	11504	5
		11226	3	11513	7
		11236	1	11515	31
		11260	1	11519	1
		11261	5	11520	7
		11263	4	11521	1
		11286	3	11532	3
		11283	7	11536	1
		11301	1	11542	1
		11302	17	11540	1
		11295	3	11548	7
		11303	4	11563	1
		11305	3	11560	1
		11319	1	11564	2
		11314	1	11583	1
		11339	10	11598	4
		11342	1	11611	1
		11348	2	11614	1
		11346	1	11613	5
		11387	3	11618	4
		11389	5	11620	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.2. Año 2013.

Nombre de región activa	Numero
11652	3
11654	2
11675	1
11686	1
11692	2
11719	2
11718	1
11726	1
11731	2
11739	2
11745	3
11748	9
11755	1
11760	1
11762	2
11777	1
11778	1
11787	1
11817	1
11818	2
11865	4
11861	1
11875	14
11877	3
11882	13
11884	4
11890	8
11891	1
11897	2
11899	1
11900	3
11893	2
11904	2
11909	1
11934	3
11928	6
11936	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.3. Año 2014.

Nombre de región activa	Numero
11936	2
11944	8
11946	1
11947	1
11967	25
11968	5
11974	14
11977	1
11976	1
11990	3
11982	2
11991	3
11986	1
11989	1
12002	6
11996	5
12010	1
12011	1
12017	4
12014	1
12027	1
12035	2
12036	1
12051	2
12055	1
12056	1
12065	1
12077	1
12080	2
12087	11
12085	3
12089	1
12106	2
12113	2
12130	2
12127	1
12149	2
12151	1
12146	2
12155	1
12157	2
12158	2
12166	2
12209	3
12222	5
12241	5
12242	7
11692	1
12169	1
12172	2
12173	3
12182	3
12192	38
12205	14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.4. Año 2015.

Nombre de región activa	Numero
12253	2
12257	3
12268	6
12277	3
12282	1
12290	5
12297	24
12320	1
12321	1
12322	7
12325	1
12339	4
12335	2
12367	3
12360	2
12365	1
12371	6
12378	1
12381	2
12403	11
12415	2
12420	1
12422	18
12437	2
12443	2
12445	2
12449	1
12472	2
12473	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.5. Año 2016

Nombre de región activa	Numero
12473	1
12497	4
12529	1
12567	7
12615	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.6. Año 2017.

Nombre de región activa	Numero
12644	7
12665	2
12672	1
12673	30
12685	1

Fuente: Elaboración propia.

b) Tablas para el criterio 3:Tiempo de duración del evento

Tabla 8.7,Año 2010.

Nombre de región activa	Numero
11041	2
11045	4
11069	1
11093	1
11112	1
11121	1

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.8.Año 2011.

Nombre de región activa	Numero
11158	3
11162	2
11164	1
11165	3
11169	1
11190	1
11195	1
11260	1
11263	1
11283	1
11295	1
11302	7
11303	2
11305	1
11339	3
11387	2
11389	2

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.9.Año 2012.

Nombre de región activa	Numero
11401	1
11402	1
11410	1
11429	5
11432	1
11434	1
11445	1
11461	1
11476	4
11471	1
11496	1
11494	1
11504	1
11513	4
11515	6
11520	1
11532	2
11536	1
11548	2
11564	1
11598	3
11613	1
11618	3
11620	2

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.10.Año 2013.

Nombre de región activa	Numero
11654	1
11675	1
11719	1
11718	1
11731	1
11739	2
11748	2
11760	1
11778	1
11283	1
11818	2
11861	1
11875	5
11884	2
11890	2
11934	1
11928	1

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.11.Año 2014.

Nombre de región activa	Numero
11936	1
11944	3
11967	6
11968	2
11974	4
11982	1
11989	1
12002	2
11996	1
12017	2
12035	1
12055	1
12065	1
12080	1
12087	3
12089	1
12113	1
12130	1
12127	1
12146	2
12157	1
12158	1
12166	2
12173	2
12172	1
12192	15
12205	3
12209	2
12222	2
12242	1
12241	1

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.12.Año 2015

Nombre de región activa	Numero
12253	1
12268	1
12277	1
12290	2
12297	5
12320	1
12322	3
12335	2
12371	2
12367	1
12381	1
12403	4
12415	1
12422	4
12437	2
12443	1

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.13.Año 2016.

Nombre de región activa	Numero
12497	2
12567	1
12615	1

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 8.14.Año 2017

Nombre de región activa	Numero
12644	3
12673	2

*Fuente: Elaboración propia.*

## Anexo B: Espectro electromagnético

El espectro electromagnético de la luz, se define como la representación gráfica de ondas electromagnéticas dispuestas según su longitud de onda, que viajan a través del espacio, a la velocidad de la luz en el vacío. Las ondas electromagnéticas son medibles, con el número de oscilaciones por segundo, la separación entre picos o valles sucesivos y el tamaño o cantidad de oscilaciones. Estas cantidades son descritas por la frecuencia,  $n$ ; longitud de onda,  $l$ ; y amplitud o intensidad,  $I$ , respectivamente, la intensidad describe la cantidad de energía que fluye en la onda electromagnética y es proporcional al cuadrado de la amplitud. ( Zwinkels,2015)

Tabla 8.15.Rango de frecuencias.

Rango de Longitud (nm)	Rango de Frecuencia( $s^{-1}$ )	Descripción
$< 0.1 \text{ nm}$	$10^{20} - 10^{23}$	Rayos Gamma
$0.1 - 10 \text{ nm}$	$10^{17} - 10^{20}$	Rayos X
$10 - 400 \text{ nm}$	$10^{15} - 10^{17}$	Ultravioleta
$400 - 700 \text{ nm}$	$10^{14} - 10^{15}$	Visible
$700 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$	$10^{11} - 10^{14}$	Infrarrojo
$1 \text{ mm} - 1 \text{ cm}$	$10^{10} - 10^{11}$	Onda de Microondas
$1 \text{ cm} - 100 \text{ km}$	$10^3 - 10^{10}$	Ondas de Radio
$100 - 1000 \text{ km}$	$10^2 - 10^3$	Frecuencias de audio

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.16. Rango de espectros.

Rango del espectro electromagnético	Color
400-430 nm	Violeta
430-480 nm	Azul
480-560 nm	Verde
560-590 nm	Amarillo
590-620 nm	Naranja
620-700 nm	Rojo

Fuente: Elaboración propia.

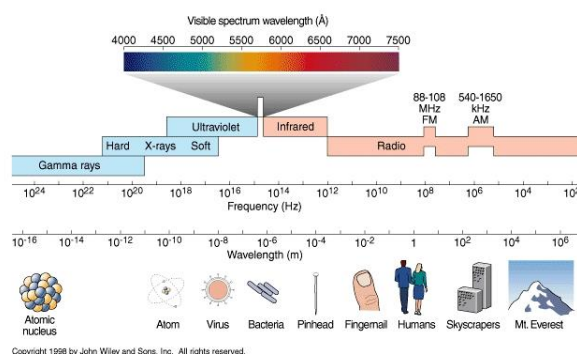


Figura 8.1.Espectro electromagnético.

En el espectro electromagnético de la luz, en cada banda del espectro desde rayos gamma hasta radio, se puede estudiar diferentes fenómenos, siendo rango de frecuencia del visible pequeña. En el caso del sol podemos observar prominencias, fulguraciones solares, granulación, etc. Fuente:University of Arizona.Web,2011

## Anexo C: Datos AIA/SDO de M4.4 / M1.4 y eyecciones de masa coronal

### I) Características del campo magnético y el plasma de la región activa durante la fulguración M4.4(18:10UT -18:40 UT)

#### a) Observaciones con Goes-15

El gráfico 8.2, representa la irradiancia medida por GOES-15 en rayos X suaves, muestra un aumento del flujo constante desde las 18.08 UT hasta las 18:14 UT, para luego mantenerse estable alcanzando su mayor valor a las 18:28 UT.

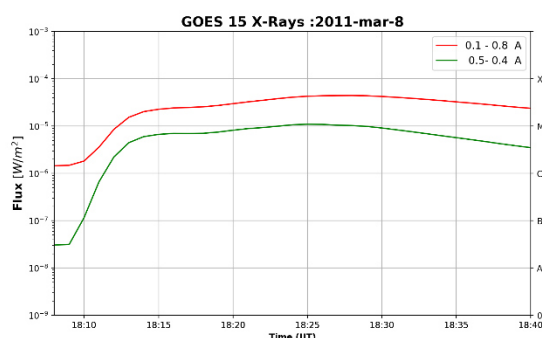


Figura 8.2.Evolución de fulguración.

Evolución de la fulguración solar en las bandas (0.1-0.5) Å (línea roja) y la banda (0.5-0.4) Å línea verde. Fuente: Elaboración propia.

#### b) Observaciones con AIA 131 Å

La banda 131 Å registra información de la corona solar y el material de las fulguraciones solares. En la figura 8.3 a las 18:10 UT se observa, los 2 bucles coronales presentes en el borde la región activa. Luego en medio de los mismo a las 18:18 UT el brillo aumenta, elevándose dos cuerdas de flujo. La presencia de la primera cuerda de flujo coincide con el inicio del aumento de rayos X en GOES-15.

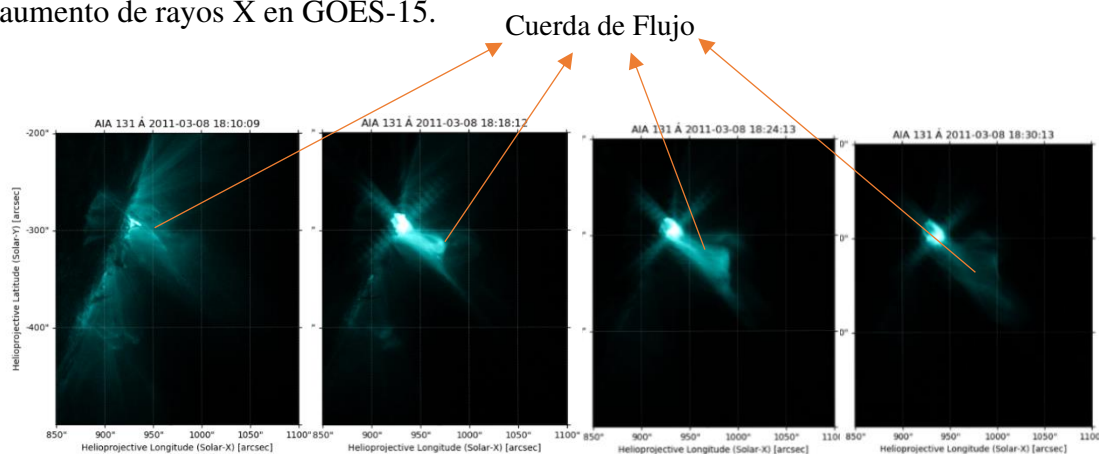


Figura 8.3.Evolución temporal de la cuerda de flujo desde las 18:24 UT hasta las 18:40 UT.

Fuente: AIA/SDO.



### c) Observaciones con AIA 94 Å

La banda de AIA 94 ( $\sim 6 \times 10^6$  °K), permite estudiar la corona alta, observando regiones donde ocurren las fulguraciones solares. En la secuencia de imágenes de la Figura 8.4, se observa con claridad la formación de una cuerda de flujo (C1) a las 18:10 UT el cual se eleva y desaparece a las 18:34 UT. Seguidamente a las 18:30 UT se eleva otra cuerda de flujo (C2) que se mantiene estable hasta las 18:40 UT

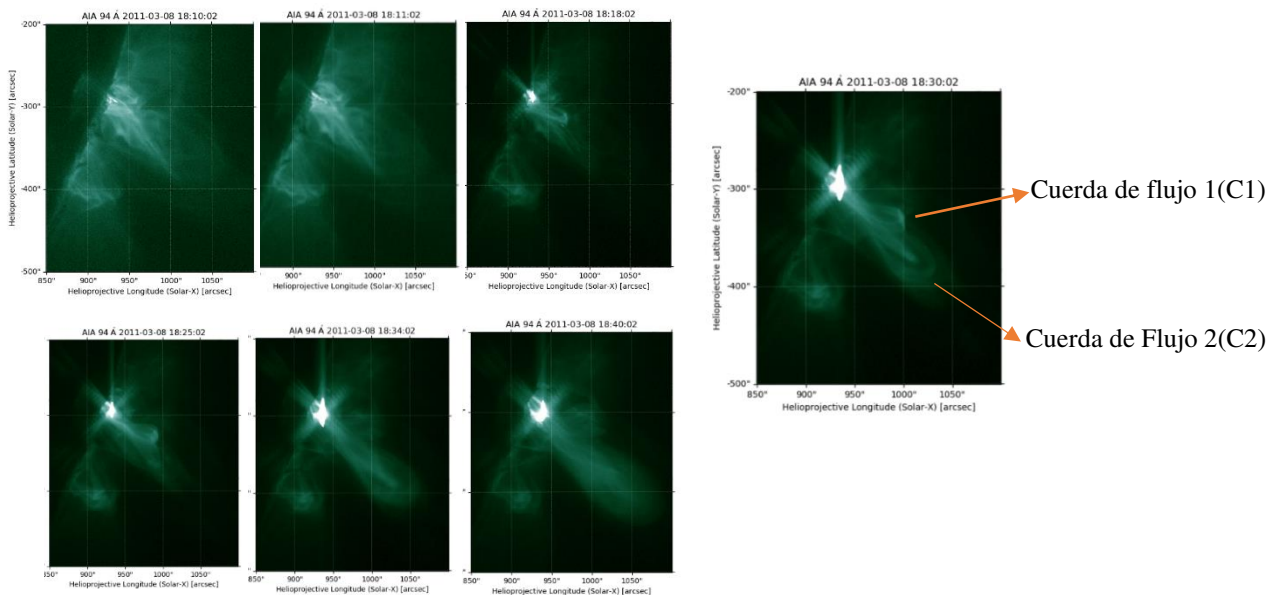


Figura 8.4. Cuerdas de flujo.

Evolución de las cuerdas de flujo desde las 18:08 UT a 18:40 UT. Las dos cuerdas de flujo identificadas en el tiempo 18:30 UT. Fuente: AIA/SDO.

### c) Observaciones con AIA 193 Å

Usando AIA 193, entre 18:10-18:40 UT, aparece una configuración de plasma magnetizado en debajo de la cuerda de flujo, forma de X (18:18 UT), configuración relacionada con el proceso de reconexión magnética en cuerda de flujo, liberando alta energía que fue captada en rayos X suaves por GOES con pico a las 18:28 UT.

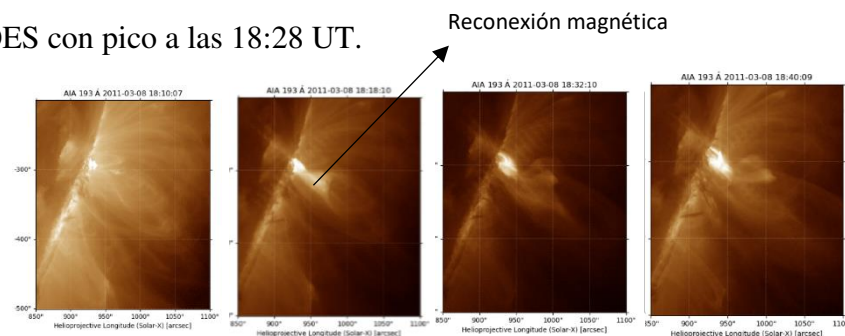


Figura 8.5. Evolución temporal con AIA 194 Å. Fuente: AIA/SDO.

#### d) Observaciones con AIA 304 Å

Emitida por He-II alrededor de 50,000 °K, esta luz se emite desde la cromosfera y la región de transición, permitiendo apreciar una lámina de plasma brillante (parte de la prominencia) (figura 8.6) que crece desde las 18:10 UT -18:14 UT, cuando la lámina estalla. A las 18:16 UT, la lámina se rompe, este fenómeno está relacionado con la erupción de una parte de la prominencia ya que dicha formación es cromosférica. Este pedazo de plasma que se desprende, va evolucionando hasta llegar a la corona y salir de la atmosfera solar

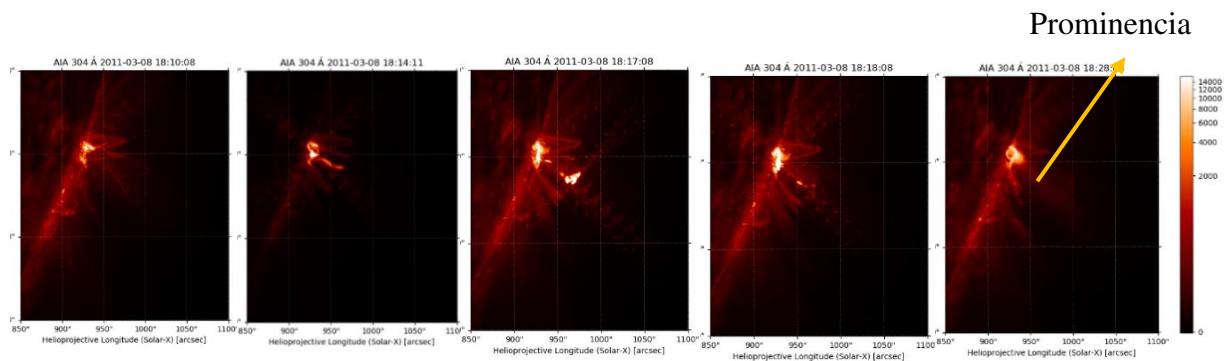


Figura 8.6.Evolución de la prominencia desde las 18:08 UT hasta 18:28 UT.

#### e) Observaciones con AIA 171 Å

Emitida por Fe-IX a alrededor de 600,000 °K, esta longitud de onda muestra la corona silenciosa y los bucles coronales, que en nuestros datos se logran observar nítidamente a las 18:10 UT. A las 18:10 UT empieza la elevación de una parte de la prominencia con mayor brillo, hasta finalmente estallar a las 18:14 UT y no muestra con claridad las dos cuerdas de flujo.

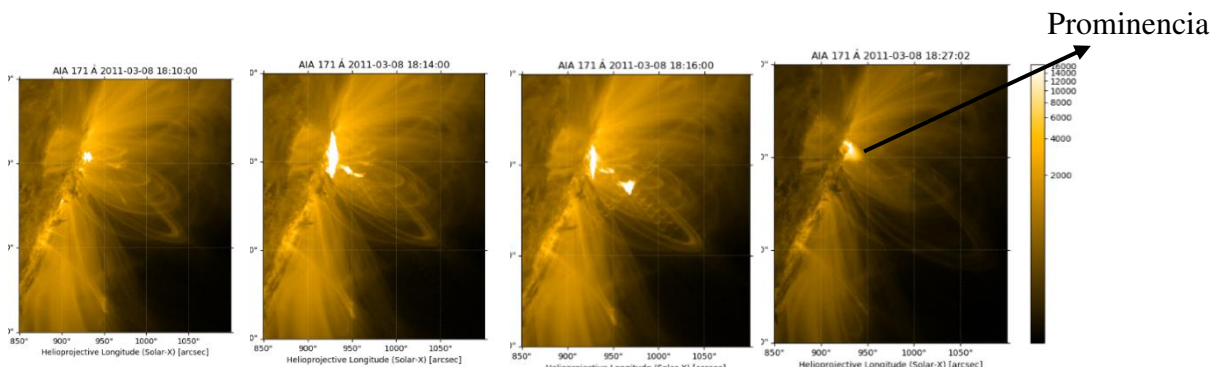


Figura 8.7.Evolución del filamento/prominencia.

## II) Características del campo magnético y la plasma de la región activa durante la fulguración M1.4(19:46 UT -21:19 UT)

Los datos de GOES-15, reflejan una fulguración entre las 19:46-21:19 UT, con un máximo a las 20:16 UT, este evento se puede interpretar como la segunda fase del primer evento M4.4, pero de menor intensidad como lo mencionan (Su et al, 2012). En la figura 8.8, se compara la evolución GOES con datos AIA/SDO 131 Å, observando que a las 19:33 UT aparecen flujos de salida de plasma, que se extienden entre las (20:08-20:15 UT), los bucles coronales en el área no evolucionan con el tiempo manteniendo su morfología.

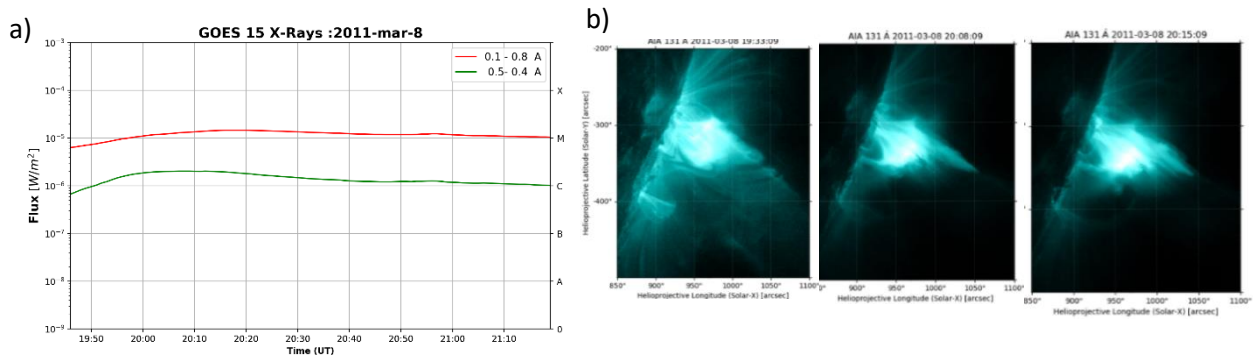


Figura 8.8.a)Evolución del evento con GOES-15 b)Evolución de la región activa asociada a la fulguración M1.4.Fuente: AIA/SDO.

### a) Observaciones con AIA 94 Å

Desde 19:33 UT se expulsan unos flujos de salida, que suben hasta alcanzar una altura de 145 000 km. Seguidamente desde las 20:00 UT va incrementando hasta que supera línea de observación de AIA /SD a las 21:13 UT, la morfología de la región activa no presenta presencia de cuerdas de flujo evolucionando.

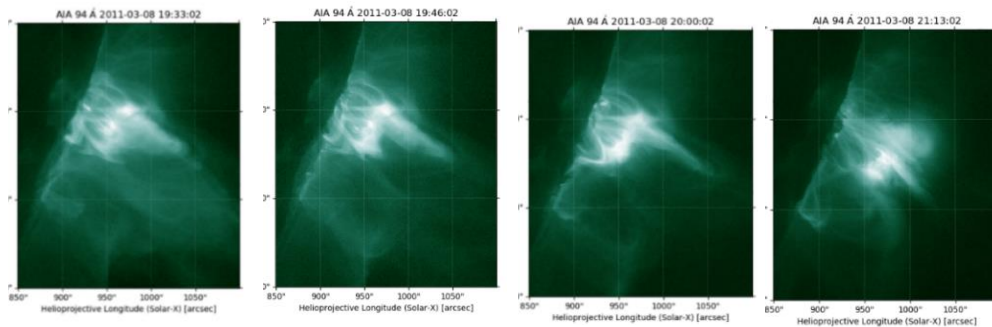


Figura 8.9.Evolución de la Región Activa NOAA 11165. Fuente: AIA/SDO.

### b) Observaciones con AIA 304 Å

A las 19:34 UT aparece una línea más brillante (plasma), asociada a las salidas de flujo (plasma eyectado) detectadas con mayor claridad en las líneas 171 Å y 131 Å. Se observa los bucles cuya morfología se mantiene hasta las 20:16 UT que coincide con el pico en emisión en GOES.-15. Desde las 20:16 UT los bucles coronales se expanden hasta las 21:18 UT, esta expansión podría ser acelerada por la presencia de los flujos de salida de plasma

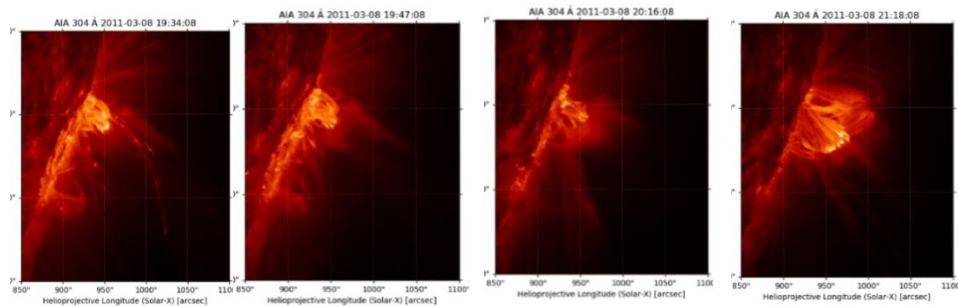


Figura 8.10. Evolución de la región activa NOAA 11165. Fuente: AIA/SDO.

### c) Observaciones con AIA 171 Å

En esta banda, se observó una línea de plasma muy delgado elevándose, el cual está asociada al flujo de salida de plasma, también detectada en AIA 131 Å, 304 Å y 94 Å. Por otro lado desde las 19:37 UT -21:19 UT, los bucles más pequeños incrementan su tamaño, este aumento puede ser generado por las salidas de plasma a las 19:33 UT. No se registra ninguna explosión o fulguración después de este tiempo en los datos GOES -15.

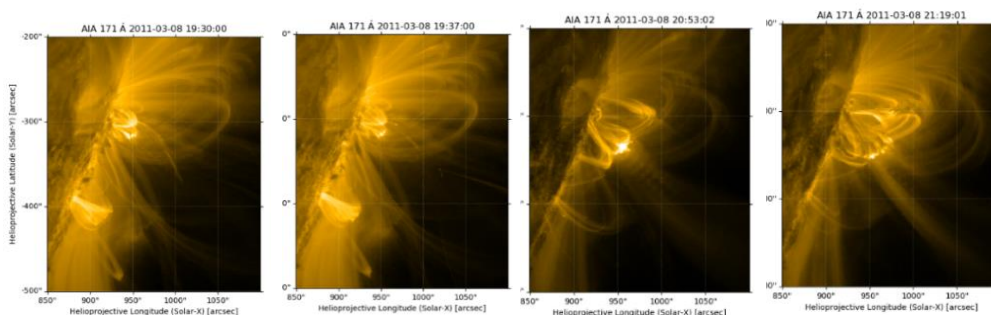


Figura 8.11. Evolución de la cuerda de flujo AIA 171 Å. Fuente: AIA/SDO.

### d) Observaciones con AIA 193 Å

Con AIA 193 Å se puede observar las zonas más calientes de la corona y de la fulguración solar asociada. A las 19:34 UT (Figura 8.12) aparece los flujos de salida, se observa que los

bucles que contienen plasma más caliente van creciendo hasta las 19:46 UT, esta evolución coincide con las observadas en AIA 171 Å y AIA 304 Å este incremento, posiblemente es generado por los flujos de salida de plasma.

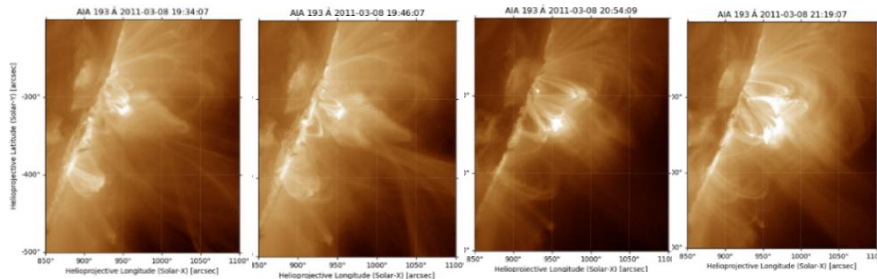


Figura 8.12. Evolución de la cuerda de flujo AIA 171 Å. Fuente: AIA/SDO.

### III) Descripción de las eyecciones de Masa Coronal asociadas a la región NOAA 11165 (18:00 UT – 22:00 UT)

De la lista de Eyecciones de Masa Coronal (CME), del detector SOHO/LASCO se extrajeron los eventos ocurridos el día 8 de marzo, ubicando dos CME registrados a las 19:06 UT, con una velocidad lineal de 283 km/s y una masa de  $3.7 \cdot 10^{15} \text{g}$ .

Las imágenes lasco (Figura 8.13), en el tiempo de registro muestran que la eyección de masa coronal tiene una dirección y posición que se puede asociar con la región activa NOAA 111655 y con el máximo de flujo ocurrido a las 18:28 UT, durante la fulguración solar ocurrida entre las (18:10-18:41) UT. Desde las 19:00 UT, se observa un incremento en el brillo de la parte sur-este del sol (cuarto cuadrante), que se mantiene constante hasta las 20 horas, la velocidad del CME estudiado es baja.

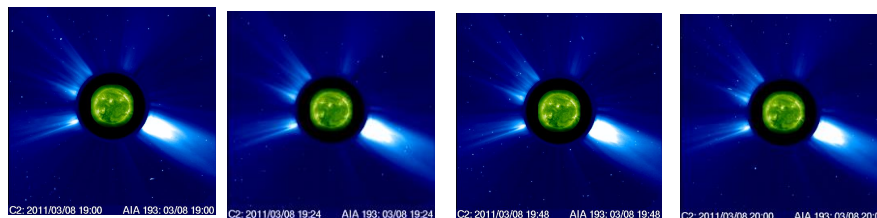


Figura 8.13. Evolución de la cuerda de flujo AIA 171 Å. Fuente: SOHO/LASCO.

La segunda eyección de Masa Coronal a las 20:12 UT también asociada a la región NOAA 111655 y a la fulguración M1.4, por el tiempo, ya que dicho evento se registra desde las 19:46 UT hasta las 21:19 UT. El CME registra una velocidad lineal de 702 km/s y una masa de



$5.4 \times 10^{15}$  g, ya que la velocidad del primer CME es 283 km/s el segundo CME alcanza al primero fusionándose o canibalizando al primer CME como lo menciona.

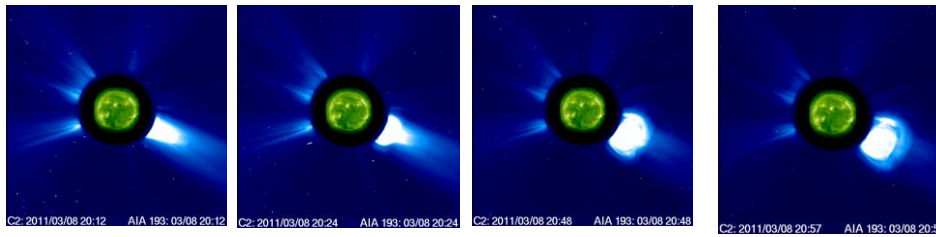


Figura 8.14. Evolución de la eyección de Masa Coronal en AIA 193. Fuente: SOHO/LASCO.

## Anexo D: Softwares de Código libre en Magnetohidrodinámica

Debido a que las ecuaciones de Magnetohidrodinámica, tienen una amplia aplicación no solo en el estudio de fluidos astrofísicos sino también en el área de generación de energía nuclear, existe varios softwares de código abierto especializados en la solución numérica de ecuaciones usando diferentes métodos y algoritmos para describir la mecánica de fluidos del plasma.

Los más usados son ATHENA, ZEUS, RAMSES, PLUTO, etc.

**ATHENA:** Código computacional escrito en lenguaje C que resuelve las ecuaciones de la magnetohidrodinámica (MHD) compresible, adiabática, flujo no viscoso, ideal, en coordenadas cartesianas y cilíndricas. Contiene, Refinamiento estático (fijo) de malla, paralelización utilizando descomposición de dominio y MPI. También hay una variedad de opciones disponibles para los algoritmos numéricos, como diferentes solucionadores de Riemann y métodos de reconstrucción espacial, hidrodinámica compresible y MHD en 1D, 2D y 3D. Este código, empezó con su desarrollo en el año 2000, dirigido por J. Stone, T. Gardiner y P. Teuben en la Universidad de Maryland. (Gardiner et al ,2008).

**ZEUS:** Código computacional escrito en lenguaje fortran 77 que resuelve las ecuaciones de la magnetohidrodinámica (MHD). Una versión tridimensional del código ZEUS-2D en F77, contiene algoritmos para hidrodinámica compresible y MHD en coordenadas cartesianas con condiciones de contorno periódicas solo en las direcciones Y y Z. Incluye rutinas para las condiciones de contorno. (Stone et al,2019).

**RAMSES:** es un código fuente abierto para modelar sistemas astrofísicos, con flujos de fluidos radiactivos, auto gravitables, magnetizados y compresibles. Se basa en la técnica Adaptive Mesh Refinement (AMR). RAMSES está escrito en Fortran 90.

**PLUTO:** Código computacional escrito en C y fortran. Adopta un enfoque de malla estructurada para la solución del sistema de leyes de conservación. Las cantidades de flujo se discretizan en una cuadrícula computacional lógicamente rectangular encerrada por un límite y aumentado con celdas de guardia o puntos fantasmas para implementar condiciones de contorno en una determinada plantilla computacional. Los cálculos se realizan utilizando aritmética de doble precisión. (Mignone et al,2018).

### **Criterios de selección de Software**

El software debe tener las siguientes características:

1. Amplia documentación, artículos científicos y guía de usuario.
2. Lenguaje de programación C, Fortran o Python.
3. Fácil instalación, prerequisites de instalación mínimos.
4. Implementable en una computadora de escritorio, poco poder computacional.
5. Desarrollado por un centro de Investigación o Universidad.
6. Soluciones numéricas de sistemas hiperbólicos y parabólicos.
7. Implementación de Volúmenes Finitos.
8. Código de distribución libre.
9. Fácil manejo de archivos de salida.
10. Ampliamente usada por la comunidad científica.

11. Módulo que desarrolle las ecuaciones de MHD resistiva.
12. Coordenadas cartesianas, cilíndricas y polares.
13. Paralización Implementada.
14. Solución del sistema de leyes de conservación.
15. Aplicable en diferentes regímenes de flujo

Tabla 8.17. Selección de software.

	ATHENA	ZEUS	RAMSES	PLUTO
1	X			X
2	X	X	X	X
3	X		X	X
4	X	X	X	X
5	X	X		X
6		X		X
7	X	X	X	X
8	X	X	X	X
9	X		X	X
10	X	X	X	X
11	X	X	X	X
12	X	X	X	X
13		X	X	X
14	X	X	X	X
15	X	X	X	X

*Fuente: Elaboración propia.*

Ya que el software PLUTO cumple con los 15 requisitos mencionados anteriormente, se eligió como código numérico para realizar la simulación del modelo planteado, del evento seleccionado.



# Bibliografía

- [1] Addison, Kevin & Pesnell, Dean (2015). Solar Dynamics Observatory Instruments. <https://sdo.gsfc.nasa.gov/mission/instruments.php>
- [2] Aly, J. J. (1991). How much energy can be stored in a three-dimensional force-free magnetic field?. *The Astrophysical Journal*, 375, L61-L64.
- [3] Amari, T., Luciani, J. F., Mikic, Z., & Linker, J. (1999). A twisted flux rope model for coronal mass ejections and two-ribbon flares. *The Astrophysical Journal Letters*, 529(1), L49.
- [4] Antiochos, S. K., Dahlburg, R. B., & Klimchuk, J. A. (1994). The magnetic field of solar prominences. *The Astrophysical Journal*, 420, L41-L44.
- [5] Babayev, E. S. (2003). Some results of investigations on the space weather influence on functioning of several engineering–technical and communication systems and human health. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 22(6), 861-867.
- [6] Bladé, Castellet (2005), E. Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, (2005). ISBN 8468985619. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2117/93706>>
- [7] Blanchett, Amy & Abadie, Laurie ( Aug 16, 2018), NASA Protects Its Superheroes From Space Weather. NASA. Recuperado de: <https://www.nasa.gov/feature/nasa-protects-its-superheroes-from-space-weather>
- [8] Cavada López-Tapia, Adriana (2015). Resolución Numérica De Las Ecuaciones De Navier-Stokes. ( Trabajo de Fin de Grado para acceder al GRADO EN FÍSICA). Universidad de Cantabria. Cantabria, España.
- [9] Chen, P. F., & Shibata, K. (2000). An emerging flux trigger mechanism for coronal mass ejections. *The Astrophysical Journal*, 545(1), 524.
- [10] Cheng, X., Guo, Y., & Ding, M. (2017). Origin and structures of solar eruptions I: magnetic flux rope. *Science China Earth Sciences*, 60(8), 1383-1407.
- [11] Cimino, (2015). Tesis de doctorado Condiciones de Contorno basadas en Características para las Ecuaciones Gasdinámicas y Magnetohidrodinámicas. Aplicación a la Dinámica de los Arcos de la Corona Solar. Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colombia
- [12] Cliver, E. W., & Dietrich, W. F. (2013). The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A31.
- [13] cliver, E.. (2000). Solar Flare Classification. *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*. 2285-. 10.1888/0333750888/2285
- [14] Cranmer, S. R., & Winebarger, A. R. (2019). The properties of the solar corona and its connection to the solar wind. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57, 157-187
- [15] De la Torre, Alberto (2009). Sobre los efectos de las escalas lentas en la Magnetohidrodinámica de un flujo de Von Kármán. (Tesis de Doctorado). Universidad de la Navarra, Navarra, España
- [16] Duarte, F.. (2015). Tunable Laser Optics. Krishnan, Ajith & Kalluvila, Jinshah. (2013). Magnetohydrodynamic Power Generation. *Int J Sci Res Publ*. 3. 1-2250.
- [17] Eymard, Robert & Thierry, Gallouet & Herbin, Raphaële. (2000). *Handbook of Numerical Analysis*. 7. 731-1018.
- [18] Fan, Y., 2008, “The Three-dimensional Evolution of Buoyant Magnetic Flux Tubes in a Model Solar Convective Envelope”, *Astrophys. J.*, 676, 680-697.
- [19] Feynman, J., & Martin, S. F. (1995). The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 100(A3), 3355-3367.

- [20] Forbes, T. G., & Isenberg, P. A. (1991). A catastrophe mechanism for coronal mass ejections. *The Astrophysical Journal*, 373, 294-307.
- [21] Fox, 2013. SDO Wavelength Graphics [Figura]. Recuperado de <https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a011000/a011071/>
- [22] Fox, Karen (2017) Solar Flares: What Does It Take to Be X-Class? ational Aeronautics and Space Administration (NASA). Recuperado de NASA's Goddard Space Flight Center,
- [23] Garner, Rob : ESA NASA / SOHO(2017), Solar Storm and Space Weather - Frequently Asked Questions Recuperado de :[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/spaceweather/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html)
- [24] Garner, Rob (2020) Solar Storm and Space Weather - Frequently Asked Questions ,NASA Recuperado de : [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/spaceweather/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html)
- [25] Garner, Rob (2020). Solar Storm and Space Weather - Frequently Asked Questions ,NASA. Recuperado de: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/spaceweather/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html)
- [26] Garner, Rob(2014): ESA NASA / SOHO(2014). NASA's SDO Shows Images of Significant Solar Flare[figura]. Recuperado de <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasas-sdo-shows-images-of-significant-solar-flare>
- [27] Godunov, S. K. (1961). Numerical solution of boundary-value problems for systems of linear ordinary differential equations. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 16(3), 171-174.
- [28] Hill, Steele, (2004) A Tangle of filaments. NASA. Recuperado de: <https://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/0226filament.html>
- [29] Holman, G. D. (2016). Scientific considerations for future spectroscopic measurements from space of activity on the Sun. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(12), 11-667.
- [30] Howard, R. A., et al. 1997, in Coronal Mass Ejections, ed. N. Crooker, J. A. Joselyn, & J. Feynman (Geophys. Monogr. 99 ; Washington, DC : AGU), 17
- [31] Isenberg, P. A., & Forbes, T. G. (2007). A three-dimensional line-tied magnetic field model for solar eruptions. *The Astrophysical Journal*, 670(2), 1453.
- [32] Jafari, A., & Vishniac, E. (2018). Introduction to Magnetic Reconnection. arXiv preprint arXiv:1805.01347.
- [33] Jenner, Lynn (2017). GOES Overview and History. NASA (National Aeronautic and Space Administration). <https://www.nasa.gov/content/goes-overview/index.html>.
- [34] John Howard Introduction to Plasma Physics C17 Lecture Notes April 15, 2002 Research School of Physical Sciences and Engineering Australian National University
- [35] Karen C. Fox (2017) Solar Flares: What Does It Take to Be X-Class? ational Aeronautics and Space Administration (NASA). NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. Recuperado de : [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/X-class-flares.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/X-class-flares.html).
- [36] Kashlinsky, A., & Odenwald, S. (2000). Clustering of the diffuse infrared light from the COBE DIRBE maps. III. Power spectrum analysis and excess isotropic component of fluctuations. *The Astrophysical Journal*, 528(1), 74.
- [37] Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y., & Inoue, S. (2020). A physics-based method that can predict imminent large solar flares. *Science*, 369(6503), 587-591.
- [38] Low, B. C., & Hundhausen, J. R. (1995). Magnetostatic structures of the solar corona. 2: The magnetic topology of quiescent prominences. *The Astrophysical Journal*, 443, 818-836.
- [39] Lemen, James & Title, Alan & Akin, David & Boerner, Paul & Chou, Catherine & Drake, Jerry & Duncan, Dexter & Edwards, Christopher & Friedlaender, Frank & Heyman, Gary & Hurlburt, Neal & Katz, Noah & Kushner, Gary & Levay, Michael & Lindgren, Russell & Mathur, Dnyanesh & McFeaters, Edward & Mitchell, Sarah & Rehse, Roger & Waltham, Nick. (2011). The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) (AIA/SDO). In *The solar dynamics observatory* (pp. 17-40). Springer, New York, NY.
- [40] Lin, J. (2004). CME-flare association deduced from catastrophic model of CMEs. *Solar Physics*, 219(1), 169-196.
- [41] Lin, R. P., Dennis, B. R., Hurford, G. J., Smith, D. M., Zehnder, A., Harvey, P. R., .. & Csillaghy, A. (2003). The Reuven Ramaty high-energy solar spectroscopic imager (RHESSI).

- In The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) (pp. 3-32). Springer, Dordrecht.
- [42] Linker, J. A., Mikić, Z., Lionello, R., Riley, P., Amari, T., & Odstrcil, D. (2003). Flux cancellation and coronal mass ejections. *Physics of Plasmas*, 10(5), 1971-1978.
  - [43] Low, B. C. (1994). Magnetohydrodynamic processes in the solar corona: Flares, coronal mass ejections, and magnetic helicity. *Physics of Plasmas*, 1(5), 1684-1690.
  - [44] Low, B. C. (1996). Solar activity and the corona. *Solar Physics*, 167(1), 217-265.
  - [45] Low, B. C., & Smith, D. F. (1993). The free energies of partially open coronal magnetic fields. *The Astrophysical Journal*, 410, 412-425.
  - [46] Magara (2020). Prominence/Filament  
[http://163.180.179.74/~magara/Lectures/2020S/TSP\\_0423.pdf](http://163.180.179.74/~magara/Lectures/2020S/TSP_0423.pdf)
  - [47] Magara(2011). Flux rope (magnetic structure of a solar filament/prominence) Recuperado de <http://163.180.179.74/~magara/page31/Topics/Fluxrope/fluxrope.html>
  - [48] Magara, T. (2007). A possible structure of the magnetic field in solar filaments obtained by flux emergence. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59(6), L51-L55.
  - [49] Magara, T., 2011, "A Possible Mechanism of Flux Cancellation via U-Loop Emergence on the Sun", Publ. Astron. Soc. Japan, 63, 417–426.
  - [50] McFadden, Christopher (May 16, 2020). 7 of the Strongest Solar Storms in Recorded History. Recuperado de: <https://interestingengineering.com/7-of-the-strongest-solar-storms-in-recorded-history>
  - [51] Mignone et al 2015. PLUTO User's Guide. <http://plutocode.ph.unito.it/files/userguide.pdf>
  - [52] Mignone, A., Bodo, G., Massaglia, S., Matsakos, T., Tesileanu, O., Zanni, C., & Ferrari, A. (2007). PLUTO: a numerical code for computational astrophysics. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 170(1), 228.
  - [53] Mignone, A., Bodo, G., Vaidya, B., & Mattia, G. (2018). A particle module for the PLUTO code. I. An implementation of the MHD–PIC equations. *The Astrophysical Journal*, 859(1), 13.
  - [54] Mignone, A. (2021). Introduction: Past, Present and Future of the PLUTO code. [PowerPoint presentation]. PLUTO Symposium (June 28-29, 2021). Online.
  - [55] Muller, C. (2014). The carrington solar flares of 1859: consequences on life. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 44(3), 185-195.
  - [56] Murphy Nick (2014). "Magnetic Reconnection". En: *Plasma Astrophysics*. (1, 23 & 28, 2014. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics). *Memorias*, Massachusetts. p.158-189.
  - [57] NASA (2015) A Guide to the Mission and Purpose of NASA's Solar Dynamics Observatory [https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/docs/SDO\\_Guide.pdf](https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/docs/SDO_Guide.pdf)
  - [58] NASA (National Aeronautic and Space Administration) (2005). Exploring magnetism in the solar Flares. Solar [Figura]. Recuperado de: [Exploring Magnetism in Solar Flares - session 4 \(berkeley.edu\)](http://www.berkeley.edu/exploring-magnetism-in-solar-flares-session-4)
  - [59] Niño, (2012). "Metodo de los volumenos finitos. ci71d modelacion numerica en ingenieria hidraulica y ambiental". Seminario de Primavera. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
  - [60] Parker, E.N., 1979. Cosmical Magnetic Fields: Their Origin and their Activity, International Series of Monographs on Physics. Clarendon Press; Oxford University Press, Oxford; New York.
  - [61] Perez, Liliana (2004) "Apunte: Ecuaciones de Maxwell" [Material del Aula – Física II] - Dpto. de Física- Facultad de Ingeniería- Universidad de Buenos Aires.
  - [62] Pitjeva, E. V.; Standish, E. M. (2009). "Proposals for the masses of the three largest asteroids, the Moon–Earth mass ratio and the Astronomical Unit". *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 103 (4): 365–372.
  - [63] PLUTO, Team (2020). The PLUTO Code. The PLUTO Code for Astrophysical Gas Dynamics. Recuperado : <http://plutocode.ph.unito.it/>
  - [64] Priest, E. (2014). Magnetohydrodynamics of the Sun. Cambridge: Cambridge University Press.
  - [65] Priest, E., & Forbes, T. (2000). Magnetic reconnection: MHD theory and applications Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1-45.

- [66] R. C. Carrington, (1859) Esq., Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 20, Issue 1, November 1859, Pages 13–15.
- [67] R. Hodgson, Esq., (1859) On a curious Appearance seen in the Sun, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 20, Issue 1, November 1859, Pages 15–16
- [68] Roussev, I. I., Forbes, T. G., Gombosi, T. I., SOkOLOV, I. V., DeZeeuw, D. L., & Birn, J. (2003). A three-dimensional flux rope model for coronal mass ejections based on a loss of equilibrium. *The Astrophysical Journal Letters*, 588(1), L45.
- [69] Sakurai, T., 1979, “A New Approach to the Force-Free Field and Its Application to the Magnetic Field of Solar Active Regions”, Publ. Astron. Soc. Japan, 31, 209–230.
- [70] Savcheva, A., Pariat, E., McKillop, S., McCauley, P., Hanson, E., Su, Y., .. & DeLuca, E. E. (2015). The relation between solar eruption topologies and observed flare features. I. Flare ribbons. *The Astrophysical Journal*, 810(2), 96.
- [71] Schafelner, Andreas (2016). Introduction to Magnetohydrodynamics.(Tesis de pre-grado). Johannes Kepler Universität,Linz,Austria.
- [72] Schnack, D. D. (2009). Lectures in magnetohydrodynamics: with an appendix on extended MHD (Vol. 780). Springer.
- [73] Schrijver, C. J., Kauristie, K., Aylward, A. D., Denardini, C. M., Gibson, S. E., Glover, A., .. & Jakowski, N. (2015). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Advances in Space Research*, 55(12), 2745–2807.
- [74] Shibata, K., & Magara, T. (2011). Solar flares: magnetohydrodynamic processes. *Living Reviews in Solar Physics*, 8(1), 1-99.
- [75] Schmieder,Brigitte and Pariat,Etienne(2007), Scholarpedia, 2(12):4335.doi:10.4249/scholarpedia.4335
- [76] Simons,Marty.(April 25, 2017).*The History of Solar Flares on Earth*.Sciencing. Recuperado de: <https://sciencing.com/history-solar-flares-earth-2401.html> ,Solar Physics Group & Trinity College Dublin &Dublin Institute for Advanced Studies.SolarMonitor.org. <https://www.solarmonitor.org/index.php>.
- [77] Spruit, H.. (2013). Essential Magnetohydrodynamics for Astrophysics. Garching. Max Planck Institute for Astrophysics
- [78] Stone(2019).The Zeus code.Princeton University. Recuperado de:<https://www.astro.princeton.edu/~jstone/zeus.html>
- [79] Stone, J. M., Gardiner, T. A., Teuben, P., Hawley, J. F., & Simon, J. B. (2008). Athena: a new code for astrophysical MHD. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 178(1), 137.
- [80] Streeter, V.L. (1966) Fluid Mechanics. McGraw-Hill.
- [81] Strong, K., Schmelz, J., Saba, J., & Kucera, T. (2017). UNDERSTANDING SPACE WEATHER: Part II: The Violent Sun. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(11), 2387-2396. doi:10.2307/26396328
- [82] Sturrock, P. A. (1991). Maximum energy of semi-infinite magnetic-field configurations. In *Flare Physics in Solar Activity Maximum 22* (pp. 224-227). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [83] Su, Y., Dennis, B. R., Holman, G. D., Wang, T., Chamberlin, P. C., Savage, S., & Veronig, A. (2012). Observations of a two-stage Solar Eruptive Event (SEE): Evidence for secondary heating. *The Astrophysical Journal Letters*, 746(1), L5.
- [84] Su, Yingna. (2007). Magnetic Shear in Two-ribbon Solar Flares. *Acta Astronomica Sinica*. Tolbert,kim (21-Jan,2017),  
GOES,[https://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes/goes\\_event\\_listings](https://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes/goes_event_listings)
- [85] Tripathi, D., Reeves, K. K., Gibson, S. E., Srivastava, A., & Joshi, N. C. (2013). SDO/AIA observations of a partially erupting prominence. *The Astrophysical Journal*, 778(2), 142.
- [86] Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Lakhina, G. S., & Alex, S. (2003). The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A7). UCAR Center for Science Education (2012),Solar Prominences <https://scied.ucar.edu/solar-prominence>

- [87] University of Arisona (2011) Geos 306, Fall 2011, Lecture 12 Recuperado de :<https://www.geo.arizona.edu/xtal/geos306/fall11-12.htm>
- [88] Van Ballegooijen, A. A., & Martens, P. C. H. (1989). Formation and eruption of solar prominences. *The Astrophysical Journal*, 343, 971-984.
- [89] Wedemeyer, Rosseland (2018). The Dynamic Chromosphere Of The Sun Solar Physics Webinar Of Global Reach - MAY 16, 2018.
- [90] Wikiband (2019). El sol. Sunspot diagram[Figura]. Recuperado de: <https://www.wikiwand.com/es/Sol>
- [91] Wood, B. E., Howard, R. A., & Linton, M. G. (2016). Imaging prominence eruptions out to 1 AU. *The Astrophysical Journal*, 816(2), 67.
- [92] Yan, X. L., Yang, L. H., Xue, Z. K., Mei, Z. X., Kong, D. F., Wang, J. C., & Li, Q. L. (2018). Simultaneous observation of a flux rope eruption and magnetic reconnection during an X-class solar flare. *The Astrophysical Journal Letters*, 853(1), L18.
- [93] Zell, Holly (Aug. 7, 2017), Layers of the Sun National Aeronautics and Space Administration (NASA). Recuperado de [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/iris/multimedia/layerzoo.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/iris/multimedia/layerzoo.html)
- [94] Zolfagharifard Ellie [2014]. Cloudy, with a chance of solar radiation: Met Office opens space weather centre to track the sun's flares and magnetic storms[Figura]. Recuperado: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2784779/Cloudy-chance-solar-radiation-Met-Office-opens-space-weather-centre-track-sun-s-flares-magnetic-storms.html>
- [95] Zwaan Go, C., 1985, "The emergence of magnetic flux", *Solar Phys.*, 100, 397–414.
- [96] Zwinkels, J. (2015). Light, Electromagnetic Spectrum. *Encyclopedia of Color*. Science and Technology, New York.